

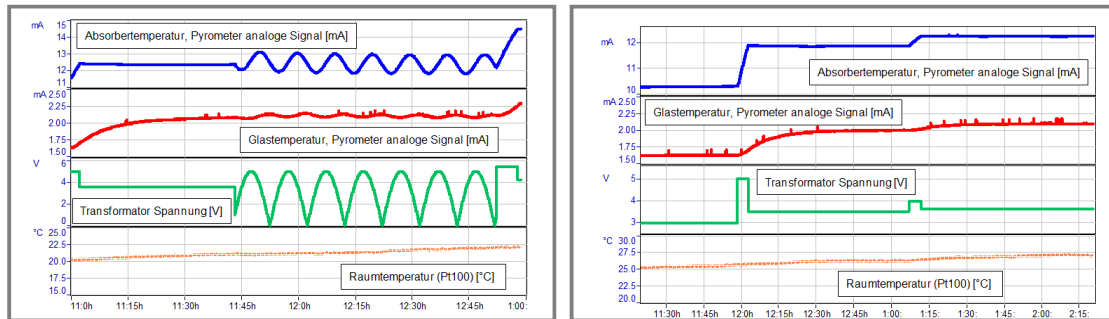
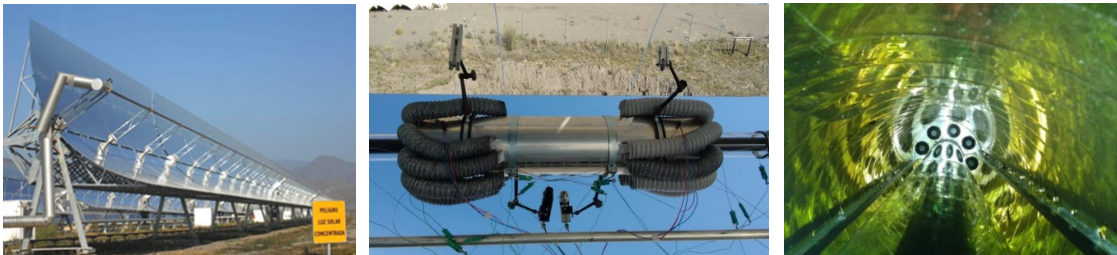
# Qualifizierung von Parabolrinnen-Receivern im Solarfeld (PARESO)

## Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Projektlaufzeit: 01. November 2011 bis 31. März 2015

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325412 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Marc Röger, Simon Caron, Johannes Pernpeintner

mit Beiträgen von

Simon Dieckmann, Christoph Hilgert, David Gärtner,  
Juliane Geller, Henning Heppner, Eckhard Lüpfer

BMWi\_0325412\_PARESO\_Schlussbericht.pdf



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Solarforschung  
Plataforma Solar de Almería  
Ctra. de Senés, s/n  
04200 Tabernas, Spanien

Tel. +34-950-259806  
e-mail: marc.roeger@dlr.de



## Inhaltsverzeichnis

<b>I. Kurzdarstellung.....</b>	<b>1</b>
I.1. Aufgabenstellung .....	1
I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	1
I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	1
I.4. Stand der Wissenschaft und Technik .....	3
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	3
<b>II. Eingehende Darstellung .....</b>	<b>4</b>
II.1. Ergebnisse .....	4
II.2. Nutzen, Verwertbarkeit, Erfahrungen.....	61
II.3. Fortschritt anderer Stellen.....	61
II.4. Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	61



## I. Kurzdarstellung

### I.1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Messverfahrens, das die Qualität von in einem Solarfeld eingebauten Parabolrinnen-Receivern bestimmt (Wärmeverluste, Emissionsgrad, Vakuumqualität). Das Messprinzip beruht dabei auf einer Reaktion der Glashüllrohrtemperatur auf eine zeitliche Änderung der Absorberrohrtemperatur. Das Absorberrohr wird z.B. über Anlegen einer Spannung bzw. über eine Temperaturänderung des darin fließenden Wärmeträgermediums thermisch angeregt und die Temperatur pyrometrisch gemessen. Aus dem ebenfalls pyrometrisch vermessenen Temperaturverlauf der Glashüllrohrtemperatur lässt sich dann auf die Qualität der Receiver schließen. Die Anregung kann entweder sinusförmig oder nicht-sinusförmig sein. Für ein Feldmessverfahren, wo nicht immer eine Spannungsquelle vorhanden ist, ist eine nicht-sinusförmige Anregung praktikabler. Zudem soll ein Konzept entwickelt werden, um mit einem spektrometrischen Messverfahren den solaren Absorptionsgrad des Receivers zu bestimmen.

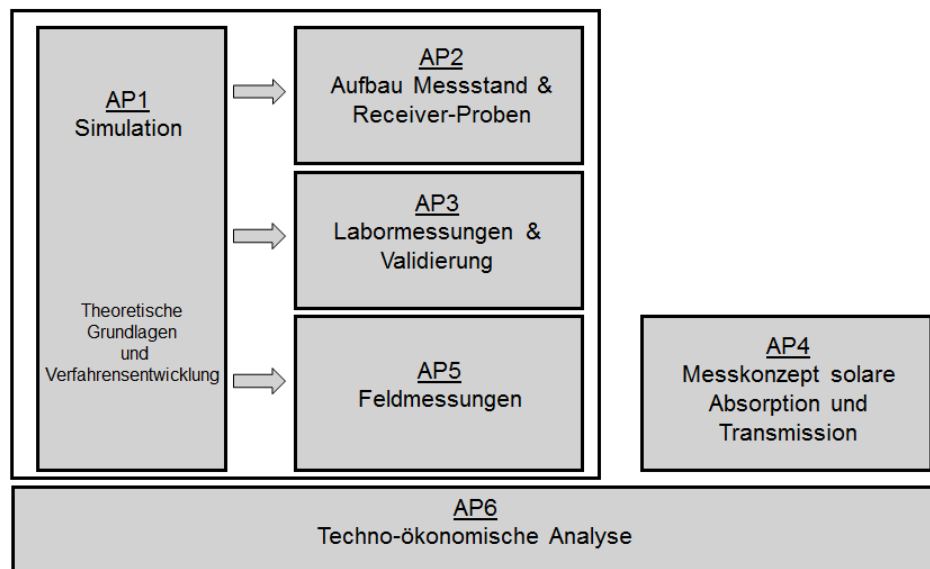
Nachdem die theoretischen Grundlagen recherchiert und die Software-Werkzeuge implementiert sind (AP1, II.1.1), werden unterschiedliche Receiver-Proben hergestellt und der Messstand aufgebaut (AP2, II.1.2). Danach wird das transiente Messverfahren zuerst unter Laborbedingungen optimiert und validiert (AP3, II.1.3). Zudem werden verschiedene Konzepte einer Feldmesstechnik zur Bestimmung des solaren Absorptionsgrads der Absorberschicht und des solaren Transmissionsgrades des Glashüllrohres experimentell und theoretisch untersucht und beurteilt (AP4, II.1.4). Schließlich wird der Messaufbau für transiente Messungen an die Bedingungen im Solarfeld angepasst (AP5, II.1.5) und Feldmessungen durchgeführt. Im letzten Arbeitspaket (AP6, II.1.6) wird ein techno-ökonomisches Software-Werkzeug erstellt, welches die Frage beantwortet, ab welchem Degradationsgrad der Austausch von Receivern ökonomisch sinnvoll ist.

### I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Hintergrund ist, dass Verfahren mit hoher Messgenauigkeit bisher auf einer Vermessung im Labor und deshalb auf einen Ausbau von bereits installierten Receivern beruhen. Dies ist mit in einem Solarfeld verbauten Receivern nicht praktikabel. Mit dem neuen Messverfahren sollen auch Receiver im eingebauten Zustand inline vermessen werden können, damit ein kontinuierliches Monitoring des Zustandes und ein objektives Entscheidungskriterium für einen Austausch geschädigter Receivern ermöglicht werden.

### I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Projekt wird ein Messverfahren entwickelt, das auch in einem Solarfeld verbaute Receiver mit hoher Genauigkeit qualifiziert. Zielgrößen sind neben dem thermischen Wärmeverlust, auch die Qualität der selektiven Beschichtung (Emissionsgrad) und die Qualität des Ringspaltvakuums (Gas-Wärmeleitung). Zudem werden verschiedene Konzepte einer Feldmesstechnik zur Bestimmung des solaren Absorptionsgrads der Absorberschicht und des solaren Transmissionsgrades des Glashüllrohres experimentell und theoretisch untersucht. Die Arbeiten bauen auf grundlegenden Erkenntnissen, die in den Labormessständen während des QUARZ-Projekts gewonnen wurden, auf. Zusätzlich wird ein Werkzeug für eine technisch-ökonomische Analyse erstellt, welches Aussagen trifft, ab welcher Degradation ein Austausch wirtschaftlich sinnvoll ist. Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang der verschiedenen Arbeitspakete.



**Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete PARESO**

Die Ziele der Arbeitspakete sind im Einzelnen:

**AP 1: Theoretische Grundlagen und Verfahrensentwicklung**

- Simulationsstudie, wie eine thermische Anregung der Receiver ohne elektrischen Strom im Feld erzeugt werden kann.
- Implementierung von Auswerte-Algorithmen zur Verarbeitung der Messsignale als Voraussetzung für AP3 und AP5.
- Erstellung von Werkzeugen und Datenbasen, mit deren Hilfe in AP3 und AP5 aus den gemessenen Signalen die Zielgrößen thermischer Wärmeverlust, die Qualität der selektiven Beschichtung und die Qualität des Ringspaltvakuums abgeleitet werden können.

**AP 2: Erzeugung von Receiver-Proben und Aufbau Messstand**

- Herstellung von Receivern unterschiedlicher Qualität. Diese Receiver werden dann später vermessen.
- Spezifikation und Beschaffung von Messsensoren und notwendiger Peripherie

**AP 3: Thermische Vermessung und Validierung im Labor**

- Optimierung des Messverfahrens unter Laborbedingungen. Hierbei Nutzung der Erkenntnisse und Werkzeuge aus AP1
- Validierungsmessungen im Labor mit DLR-ThermoRec als Referenz

**AP 4: Konzeptentwicklung zur Messung der solaren Absorption und Transmission im Feld**

- Untersuchung mehrerer Messvarianten mit Raytracing-Analysen, experimentellen und theoretischen Voruntersuchen
- Beurteilung der Messvarianten in Hinblick auf erwartete Messunsicherheit, Entwicklungsrisiko und finanziellem Aufwand und abschließende Favorisierung eines Konzeptes

**AP 5: Feldmessungen**

- Aufbau eines feldtauglichen Messsystems
- Optimierung des Messverfahrens und Messung bei verschiedenen Umgebungsbedingungen und mit verschiedenen Anregungen

*AP 6: Techno-Ökonomische Analyse und Dokumentation*

- Erstellen eines Software-Werkzeugs, welches die Aussage erlaubt, ab welchem Degradationsgrad der Austausch eines Receivers ökonomisch sinnvoll ist.
- Verfassen der Dokumentation

**I.4. Stand der Wissenschaft und Technik**

Im Bereich der optischen Qualifizierung von solaren Konzentratoren konnte in den letzten Jahren dank Forschungsförderung und konsequenter Umsetzung in den Markt große Fortschritte in der Qualitätssicherung, Optimierung und damit Ertragssteigerung von solarthermischen Kraftwerken erreicht werden (z.B. DLR-Projekte OPAL, SAPHIR, QUARZ, QUARZ-Zert und Umsetzung in den Markt durch Ausgründung).

Der Wärmeverlust in einem solaren Parabolrinnenkraftwerk allein über die Receiver beträgt über das Jahr gerechnet rund 10% der im Kollektorfeld eingefangenen Energiemenge. Damit spielt die thermische Qualität, ähnlich wie die optische Qualität, eine wichtige Rolle in einem Solarfeld. Im Bereich der thermischen Qualifizierung von Receivern sind im Rahmen des QUARZ-Projektes Labormess- und Prüfverfahren entwickelt worden, die es erlauben, einzelne Receiver optisch und thermisch zu vermessen (DLR-Teststände ThermoRec, OptiRec, ElliRec, SolaRec).

Die entwickelten Verfahren erlauben es jedoch nicht, in einem Solarfeld eingebaute Rohre zu quantitativ zu vermessen. Hier gibt es derzeit nur die Möglichkeit, die Temperatur des Glashüllrohres zu bestimmen, um damit Rückschlüsse auf die Wärmeverluste zu ziehen. Da die Glashüllrohrtemperatur stark durch die Umgebungseinflüsse von Wind und Umgebungsstrahlung beeinflusst wird, besitzt das Verfahren nur eine geringe Messgenauigkeit. Zudem können die derzeit verfügbaren Verfahren nicht zwischen den Verlustmechanismen, d.h. Emissionsgrad der selektiven Absorberrohrbeschichtung und Konvektion über den Ringspalt unterscheiden.

Im Rahmen des QUARZ-Projektes wurden erste Simulationen und Versuche zum transienten Messverfahren zur Bestimmung der Wärmeverluste von Receivern im Feld durchgeführt, mit denen das Funktionsprinzip bestätigt wurde. Ausgehend vom QUARZ-Projekt wurde ein Patent angemeldet und eine Veröffentlichung auf der SolarPACES-Konferenz veröffentlicht, auf dem die Arbeiten dieses Projektes aufbauen:

- Offenlegungsschrift DE102010034204A1 Verfahren zur thermischen Qualifizierung eines Receiverrohres von Solaranlagen).
- M. Röger, P. Potzel, J. Pernpeintner, A New Transient Thermography Method For Parabolic Trough Receiver Heat Loss Measurement. SolarPACES 2010, September 21-24, Perpignan, France, 2010.

Zudem wurden in wissenschaftlichen Publikationen, Zeitschriften und Fachbüchern umfangreiche Recherchen durchgeführt.

**I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Feldtests dieses Forschungsprogramms wurden am Kollektor-Prüfstand KONTAS durchgeführt, welcher gemeinschaftlich mit dem spanischen Partner des DLR auf der Plataforma Solar de Almería CIEMAT genutzt wird.

Teilergebnisse des Projektes flossen in die SolarPACES Task-III Arbeitsgruppe „Receiver“ ein.

## II. Eingehende Darstellung

### II.1. Ergebnisse

#### II.1.1. AP1 – Theoretische Grundlagen und Verfahrensentwicklung

Ziel des AP1 ist die Erstellung der notwendigen Software-Werkzeuge, welche als Grundlage für ein effizientes Design des Messaufbaus, eine korrekte Durchführung des Messverfahrens und eine Auswertung der Rohdaten dienen.

##### II.1.1.1. Erweiterung des numerischen Modells

Ein aus einer Vorstudie des QUARZ Projekts hervorgegangenes, dynamisches numerisches Modell wurde zur Software-Bibliothek „ReceiverTransThermo.mo“ umstrukturiert und erweitert. Die Bibliothek ist in der objektorientierten Modellierungssprache Modelica erstellt. Die Bibliotheksarchitektur ist in Abbildung 2 dargestellt.

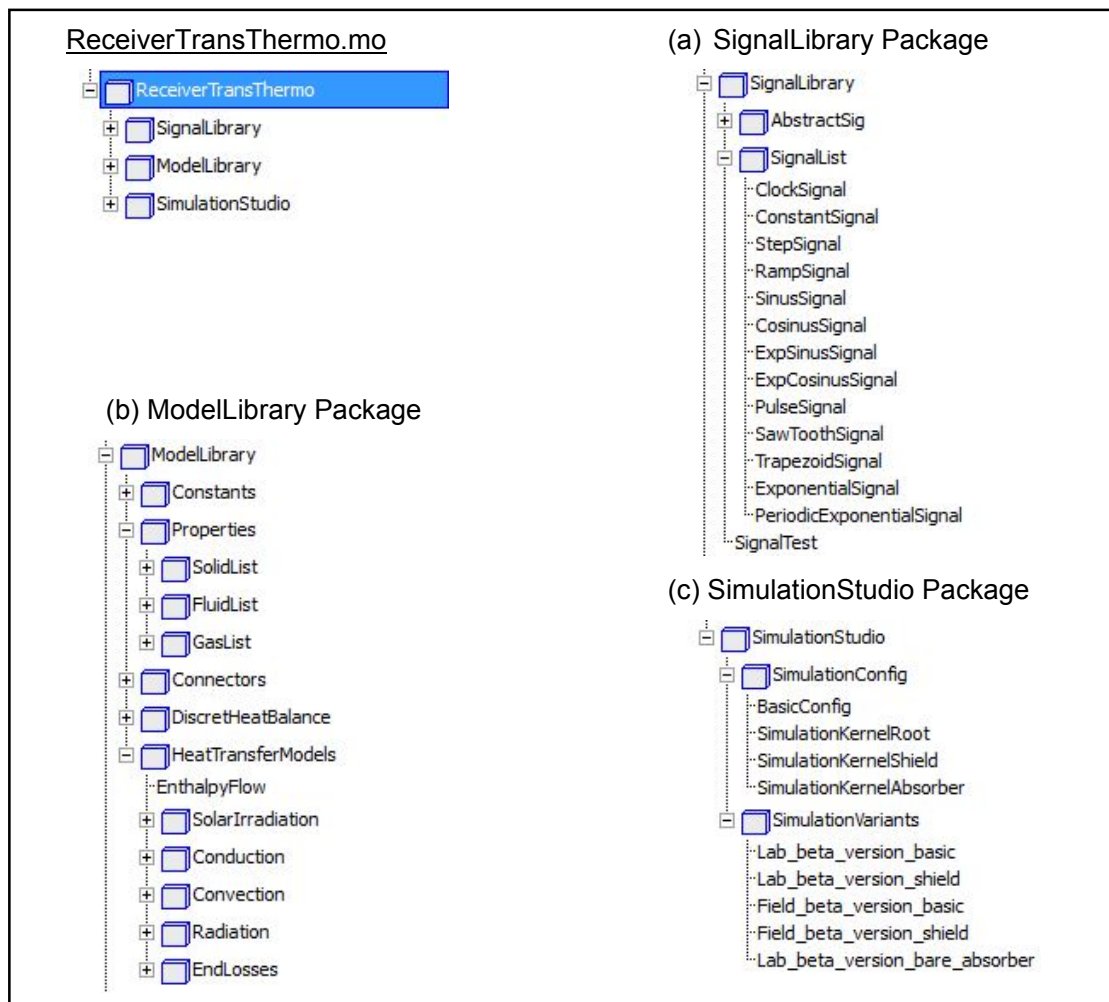


Abbildung 2: Architektur der Software-Bibliothek „ReceiverTransThermo“ nach Umstrukturierung.



Die *ReceiverTransThermo*-Bibliothek erweitert die verfügbaren Modelica-Bibliotheken hinsichtlich einer transienten thermophysikalischen Modellierung von Parabolrinnen-Receiver. Sie besteht aus drei Paketen:

- Das Paket *SignalLibrary* (a) kann verschiedene ideale transiente Anregungssignale erzeugen. Es stellt eine Erweiterung der Standard-Bibliothek *Modelica.Block.Sources* dar.
- Das Paket *ModelLibrary* (b) enthält verschiedene Modellbausteine:
  - (i): relevante physikalische Konstanten,
  - (ii): thermophysikalische Eigenschaften von Festkörpern und Flüssigkeiten,
  - (iii): Temperatur- und Wärmefluss- Schnittstellen,
  - (iv): über Ort und Zeit diskretisierte, differentiale Wärmebilanzgleichungen und
  - (v): Wärmeübertragungsmodelle und deren Varianten.
- Das Paket *SimulationStudio* (c) verknüpft die Modellbausteine aus den vorherigen Paketen in zwei Schritten:
  - Über das Subpaket *SimulationConfig* werden die Modell Parameter, das geometrisch diskretisierte Gitter sowie die Konfigurationen der einzelnen Subkomponenten definiert.
  - Das Paket *SimulationVariants* verknüpft diese Konfiguration mit externen Randbedingungen. Dieses Subpaket enthält ausführbare Programmdateien, die von der Simulationsumgebung Dymola interpretiert und kompiliert werden können.

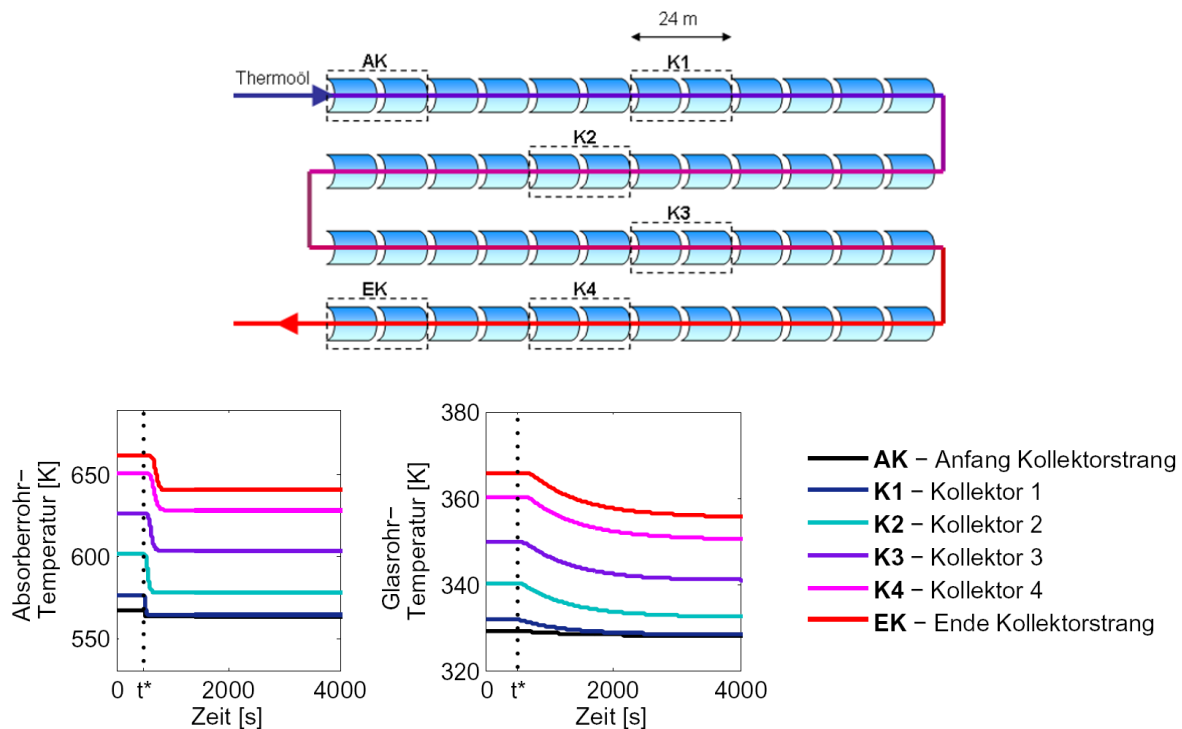
Die Modellbibliothek wurde mit Hilfe veröffentlichter Messdaten für stationäre Labormessungen sowie eigenen Messergebnissen aus dem AP3 validiert.

#### **II.1.1.2. Simulationsstudie zu geeigneten und realisierbaren Anregungssignale ohne Stromversorgung (Feldmessungen)**

Für die Entwicklung des Messverfahrens sowie zur Qualifizierung von Receiver im Labor wird auf eine Beheizung und transiente Anregung mittels Strom zurückgegriffen. Zur Qualifizierung von Receiver in einem aufgebauten Solarfeld ist die Beheizung mit Strom allerdings wenig praktikabel. Aus diesem Grund wird in diesem Arbeitspaket mit Hilfe von Simulationsstudien abgeschätzt, inwiefern transiente Anregungssignale im Solarfeld erzeugt werden können. Die nicht notwendigerweise sinusförmige Anregung kann durch mehrere Arten im Solarfeld erzeugt werden, z.B.:

- Variation der Einlass-Temperatur des Wärmeträgerfluids in den Loop
- Variation des Massenstromes des Wärmeträgerfluids
- Defokussierung des ersten Kollektors im Loop

Diese Fälle wurden mit dem erweiterten numerischen Modell in Simulationsstudien untersucht. Abbildung 3 zeigt exemplarisch simulierte Absorber- und Glashüllrohrtemperaturen an verschiedenen Stellen des Loops nach Defokussierung des ersten Kollektors. Die Temperaturantwort des Glashüllrohres auf die Änderung der Absorberrohrtemperatur wurde in AP 1.3 (II.1.1.3) mit Hilfe von Algorithmen hinsichtlich des Frequenzganges ausgewertet.



**Abbildung 3: Simulierter Loop sowie Temperaturänderungen des Absorber- und Glashüllrohres an verschiedenen Punkten des Loops (intakte Receiver). Die Temperaturänderungen können zur Qualifizierung der Receiver verwendet werden.**

Die Ergebnisse der Simulationsstudie sind:

- Eine Anregung durch Defokussierung des ersten Kollektors eines Loops erzeugt eine ausreichend große Störung für die stromaufwärts liegenden Kollektoren
- Aus allen Anregungsformen kann der Frequenzgang innerhalb der vorgegebenen Genauigkeitsschranken ermittelt werden. Die Auslenkungen der Temperaturkurven sind ausreichend hoch.
- An allen Messpunkten wurde der Amplitudengang  $A(\omega)$  und Phasengang  $\varphi(\omega)$  ausreichend genau bestimmt. Die Wahl des optimalen Messpunktes ist stets abhängig von der gewählten Anregungsform.
- Die Frequenz  $\omega=2\pi/600$  Hz als Messfrequenz ist ein guter Kompromiss aus Genauigkeit in der Bestimmung des Amplituden-, sowie des Phasengangs.
- In einem intakten Receiver wird der Frequenzgang minimal genauer bestimmt, als in einem Receiver, bei dem Wasserstoff in das Vakuum eingetreten ist.

Weitere Details der Studien lassen sich in [Geller 2012] nachlesen.

### II.1.1.3. Recherche und Implementierung von Auswertalgorithmen transienter Signale

Zur Bestimmung der Zielgrößen Emissionsgrad der selektiven Beschichtung  $\varepsilon_{\text{abs}}$  [%], Qualität des Ringspaltvakuums  $h_{\text{ann}}$  [W/m<sup>2</sup>K], und längenspezifische Wärmeverlust  $\dot{Q}'_{\text{loss}}$  [W/m] wurden vier Möglichkeiten identifiziert:

1. Erstellung von *Datenbasen* mit dem Simulationsmodell aus AP1.1 (II.1.1.1) und Bestimmung der Zielgrößen mittels Interpolation aus hinterlegten *Look-up-Tabellen*
  - $\{\varepsilon_{\text{abs}}; h_{\text{ann}}\} = \text{Look-up}(A(\omega), \varphi(\omega), T_{\text{abs,o}}, T_{\text{gl,o}}, T_{\text{air}})$  via Look-up-Tabelle
  - wobei  $T_{\text{abs,o}}$  und  $T_{\text{gl,o}}$ , die äußere Absorberrohr- bzw. Glasshüllrohrtemperatur und  $T_{\text{air}}$  die Lufttemperatur sind
2. Erstellung eines *vereinfachten, linearisierten, analytischen Modells* ausreichender Genauigkeit, welches durch Umformung erlaubt, die Zielgrößen aus den Messgrößen zu bestimmen
  - $\{\varepsilon_{\text{abs}}; h_{\text{ann}}\} = f_{\text{analyt}}(A(\omega), \varphi(\omega), T_{\text{abs}}, T_{\text{gl}}, T_{\text{air}})$  via analytisches Modell
3. Nutzung des numerischen Modells aus AP1.1 (II.1.1.1) mit einem Satz von Startwerten für die Rohrqualität  $\{\varepsilon_{\text{abs}}; h_{\text{ann}}\}$  und deren iterative Optimierung solange bis gemessene und modellierte Größen identisch sind
  - Variante 3a): *Multikriterielle numerische Optimierung*: Nutzung von Amplituden- und Phasengang zum Vergleich von Modellergebnis und Messung unter Annahme einer festen Umgebungstemperatur und der linearen Systemtheorie
  - Variante 3b): *Monokriterielle numerische Optimierung*: Nutzung von gemessener und simulierter Glastemperatur zum Vergleich von Modellergebnis und Messung unter Einspeisung von gemessener Absorber- und Umgebungstemperatur in das numerische Modell (unter Verzicht über den Umweg der Berechnung von  $A$  und  $\varphi$ )

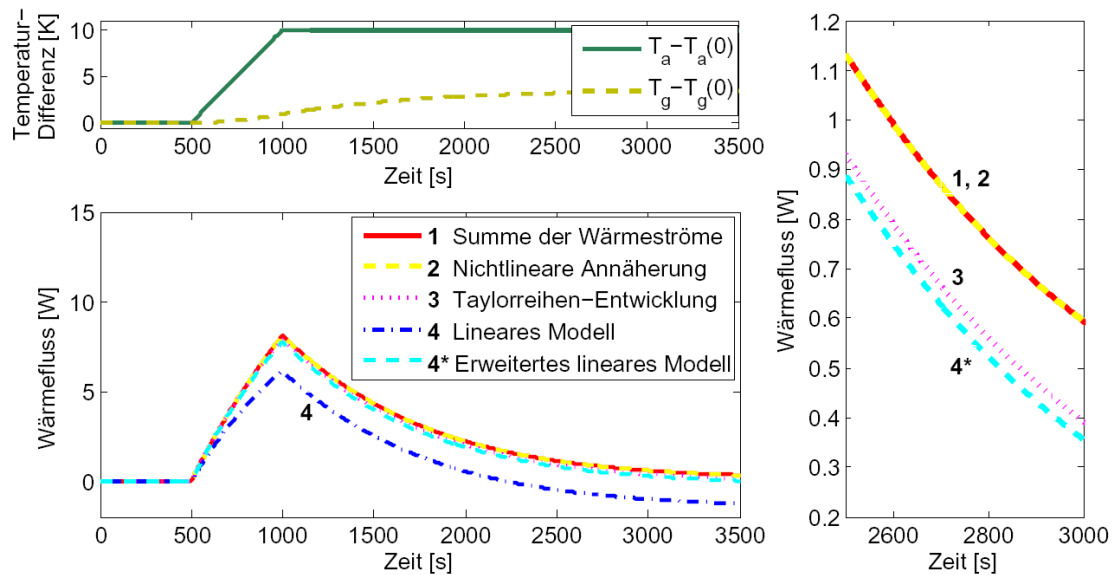
Alle Möglichkeiten wurden innerhalb des PARESO-Projektes implementiert und getestet. Möglichkeit 1 führt zur Lösung, allerdings wäre für eine ausreichende Genauigkeit eine sehr große Datenbasis (7-dimensionaler Raum) notwendig, so dass dieses Verfahren nur eingeschränkt geeignet ist.

Die Möglichkeit 2, ein vereinfachtes, analytisches Modells zu nutzen, liefert nur bedingt genaue Ergebnisse und wurde daher aufgegeben. Der Receiver konnte durch eine lineare Annäherung als PT1 System und eine Taylorreihenentwicklung des physikalischen Modells beschrieben werden, (siehe unten, Seite 8 bis 11). Größere Abweichungen des analytischen Modells zum numerischen Modell gab es allerdings vor allem im Bereich degradierte Receiver.

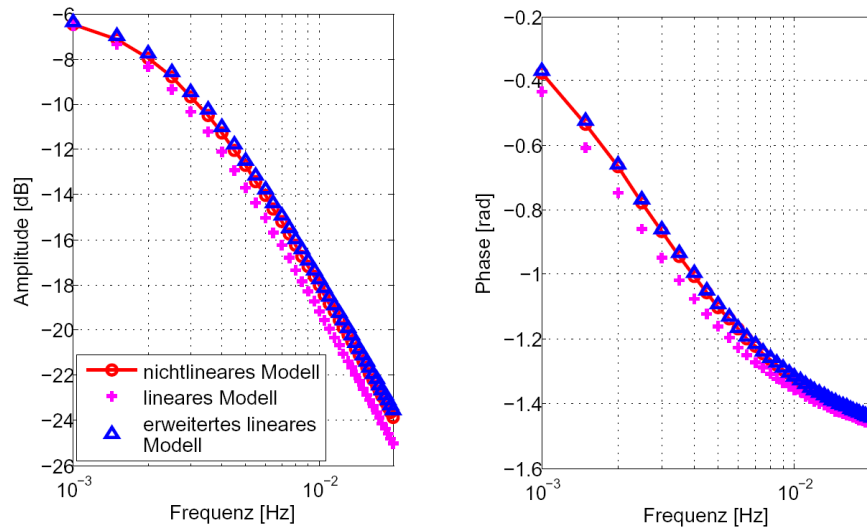
Die Möglichkeit 3 verbindet das numerische Modell aus AP1.1 (II.1.1.1) mit einem ableitungsfreien hybriden Optimierungsverfahren (siehe unten, Seite 11 bis 15). Die Variante 3a des Umwegs über Amplitudengang  $A$  und Phasengang  $\varphi$  wurde aufgegeben, da veränderte Umgebungseinflüsse, insbesondere die Veränderung der Umgebungstemperatur, nicht berücksichtigt werden konnte und das System dann nicht mehr vollständig der linearen Systemtheorie unterliegt. Durch den Verzicht der Berechnung von  $A(\omega)$  und  $\varphi(\omega)$  in der Variante 3b und der direkten Nutzung der gemessenen Temperatursignale  $T_{\text{abs,o}}(t)$ ;  $T_{\text{gl,o}}(t)$  und  $T_{\text{air}}(t)$  können fluktuierende Umgebungstemperaturbedingungen mitberücksichtigt werden. Zudem unterliegt die Auswertung nicht der Näherung der linearen Systemtheorie und deckt auch Nichtlinearitäten ab. Diese Methode führt daher auch unter Feldbedingungen zu den robustesten und genauesten Ergebnissen und wird im Projektverlauf eingesetzt.

## Zu Möglichkeit 2: Auswertung über linearisiertes Modell am Arbeitspunkt über Amplituden- und Phasengang

Für diese Möglichkeit wurde zuerst die Hypothese überprüft, die für eine erfolgreiche Auswertung mit Hilfe linearer Systemtheorie notwendig ist. Das nichtlineare System, bestehend aus Absorberrohr, Glashüllrohr, dazwischenliegendem Ringspalt und Umgebung muss als lineares, zeitunabhängiges System an einem Arbeitspunkt approximierbar sein. Dies wurde im Rahmen des AP 1.3 (II.1.1.3) bestätigt. Eine Fehlerabschätzung wird durchgeführt, und ein lineares, sowie ein erweitertes, lineares Modell mit temperaturabhängigen Koeffizienten werden aufgestellt. Abbildung 4 zeigt, dass das erweiterte lineare Modell (hellblau) das nichtlineare System am betrachteten Arbeitspunkt gut repräsentiert. Abbildung 5 zeigt Amplituden- und Phasengänge. Das System kann also an einem Arbeitspunkt über eine Linearisierung angenähert werden und es können Auswertemethoden der linearen Systemtheorie angewendet werden. Im Gegensatz zum erweiterten linearen Modell stellt das (nicht-erweiterte) lineare Modell (dunkelblau) das nichtlineare System nur in befriedigender Qualität dar.

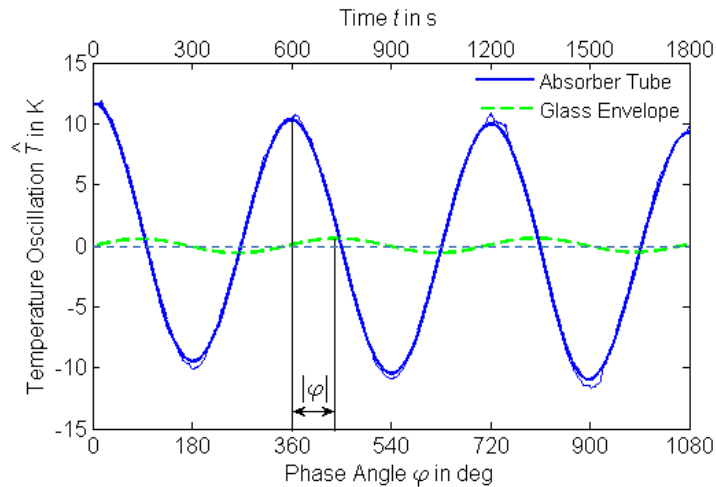


**Abbildung 4: Annäherung der Wärmeströme durch die Taylorreihen-Entwicklung, sowie das lineare und das erweiterte lineare Modell für einen neuen Receiver ( $\epsilon_{abs} = 0.09$ ,  $h_{ann} = 0.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Das erweiterte lineare Modell repräsentiert das nichtlineare System gut.**



**Abbildung 5: Amplituden- und Phasengänge der unterschiedlichen Modelle für einen Receiver mit perfekter Beschichtung und Wasserstoff im Ringspalt ( $\varepsilon_{abs} = 0.09$ ,  $h_{ann} = 8.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).**

Bei einer Anregung mit einem Sinus-Signal können Amplituden- und Phasengang für die entsprechende Frequenz direkt aus dem Amplitudenverhältnis und der Phasenverschiebung von Absorber- und Glashüllrohrtemperatur abgelesen werden ("Sinus Verfahren", siehe Abbildung 6 und [Röger 2014]).



**Abbildung 6: Bei sinusförmiger Anregung können Amplitudenverhältnis und Phasengang für die Anregungsfrequenz direkt bestimmt werden.**

Bei einer Anregung mit einem nicht-sinusförmigen Signal wie z.B. in einem Solarfeld ohne Möglichkeit einer elektrischen Beheizung müssen die transienten Temperatursignale einer Frequenzanalyse unterzogen werden. Hierfür wurden folgende Algorithmen recherchiert und implementiert:

- **„Knickgeraden-Verfahren“:** Dieses Verfahren ist in [Geller 2012] beschrieben. Die Idee besteht darin, die Sprungantwort als Systemantwort auf die Sprungfunktion durch sogenannte Knickgeraden anzunähern. Zum Frequenzgang kommt man durch die Bildung fiktiver Systeme, in denen Ein- und Ausgangssignal jeweils die Sprungantworten bilden.

- **Verzögerungsglied-Verfahren:** Im Rahmen des AP1 wurde gezeigt, dass das lineare, zeitinvariante System ein Verzögerungsglied erster Ordnung (PT1-System) darstellt. Die Idee ist daher, die Parameter  $C_1$  (Verstärkungsfaktor) und  $C_2$  (Zeitkonstante) des PT1-System (Gl.1) so anzupassen, dass die Summe der quadrierten Differenzen zwischen der Systemantwort des PT1-Systems und der gemessenen Glashüllrohrantwort minimal ist.

$$F(j\omega) = \frac{C_1}{1 + j\omega C_2} \quad (\text{Gl.1})$$

$$A(\omega) = \frac{C_1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot C_2^2}} \quad (\text{Gl.2})$$

$$\varphi(\omega) = -\tan^{-1}(\omega C_2) \quad (\text{Gl.3})$$

Die Suche der optimalen Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  ist damit eine Problemstellung der nicht-linearen Regression. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems wurden das Downhill-Simplex Verfahren (Nelder-Mead Verfahren) verwendet. Mit Hilfe der Kenntnis von  $C_1$  und  $C_2$  und der analytischen Formel des PT1-Systems lassen sich dann Amplituden- und Phasengang bestimmen (Gl. 2 und 3).

- **Kleinste-Quadrate-Verfahren:** Das Kleinste-Quadrate-Verfahren beruht wie das Verzögerungsglied-Verfahren auf der Tatsache, dass es sich bei dem System näherungsweise um ein PT1-System handelt. Über die Methode der kleinsten Quadrate lassen sich die gesuchten Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  so bestimmen, dass die Abweichung der Systemantwort des PT1-Systems zur gemessenen Glashüllrohrantwort minimal ist.

Zur Validierung der Verfahren werden die Rohrtypen "Neues Rohr" und "Wasserstoff-Rohr" für einen Kollektorloop in der Simulationsumgebung Dymola modelliert und beispielhaft durch Variation der Wärmeträgertemperatur angeregt. Aus den resultierenden Absorber- und Glastemperaturen am zweiten Kollektor und am Ende des Kollektorstranges wird der Frequenzgang unter Anwendung der Verfahren berechnet und mit dem Referenzwert aus dem Sinus-Verfahren verglichen. Weitere Informationen zu den Verfahren finden sich in [Geller 2012].

In Tabelle 1 sind die Abweichungen im Frequenzgang gemittelt über die Frequenzen  $\omega$  im Intervall zwischen 0.001 und 0.020 Hz notiert. Die kleinsten Abweichungen sind in der Tabelle umrahmt. Das Kleinste-Quadrate-Verfahren und das Verzögerungsglied-Verfahren arbeiten vor allem bei der Bestimmung des Phasengangs wesentlich verlässlicher als das Knickgeraden-Verfahren und kommen ohne Glättung aus. Die Abweichungen bei der Phasengang-Bestimmung sind für diese beiden Verfahren ähnlich groß. Bei der Amplitudengang-Bestimmung arbeiten das Kleinste-Quadrate-Verfahren und das Verzögerungsglied-Verfahren ebenfalls sehr gut.

Die auf Basis einer Fehlerabschätzung bestimmte, maximal zugelassene 1- $\sigma$ -Abweichung bei der Bestimmung des Amplitudengangs von max. 0.001 [-] und des Phasengangs von max. 0.01 rad werden vom Kleinste-Quadrate-Verfahren und Verzögerungsglied-Verfahren eingehalten. Daher sind diese beiden Verfahren gut für die vorgesehene Anwendung geeignet, solange die notwendigen Hypothesen für die Auswertung mit Hilfe der linearen Systemtheorie gültig sind. Details können in [Geller 2012] nachgelesen werden.

**Tabelle 1: Abweichungen der Verfahren zur Frequenzgangbestimmung vom Sollwert im Amplituden- und Phasengang (Mittelwerte im Intervall  $\omega = [0.001, 0.020]$  Hz; Abkürzungen: Knick: Knickgerade-Verf.; Verz: Verzögerungsglied-Verf.; Quad: Kleinste-Quadrate-Verf.)**

Messstelle	Amplitudengang			Phasengang		
	Knick	Verz	Quad	Knick	Verz	Quad
„Neues Rohr“, Kollektor 2	0.0022	0.0005	0.0002	0.002	0.003	0.005
„Neues Rohr“, Kollektor 4	0.0032	0.0003	0.0002	0.005	0.003	0.004
„Wasserstoff-Rohr“, Kollektor 2	0.0070	0.0011	0.0015	0.002	0.006	0.005
„Wasserstoff-Rohr“, Kollektor 4	0.0081	0.0008	0.0014	0.003	0.005	0.004
$\emptyset$	0.0051	0.0007	0.0008	0.003	0.004	0.004

Im Lauf der Durchführung der verschiedene Labor- und Feldmesskampagnen (AP3 und AP5) wurde festgestellt, dass folgende Einflüsse die Genauigkeit der Bestimmung von Amplituden- und Phasengang limitieren:

- Ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis bei Messung der Glastemperatur
- Drift in der Umgebungstemperatur um  $\pm 1K$  verletzt die Annahmen der Modellvorstellung konstanter Umgebungstemperatur und hat zur Folge, dass die Antwort der Glastemperatur nicht vollständig der Anregung der Absorbertemperatur folgt.
- Wegen der nicht optimal geregelten Steuerung der elektrischen Heizungsquelle bzw. Umgebungseinflüsse wie Wind könnten die Absorber- sowie die Glastemperatur vor einer transiente Anregung praktisch nie einen stationäre Zustand erreichen. Zur Kompensation der Drift wurden für sinusförmige Signale Korrekturen des Trends implementiert. Diese Algorithmen konnten aber nicht direkt auf die nicht sinusförmigen Signale übertragen werden.

Aus diesem Grund wird die Annahme der linearen Systemtheorie und des an einem Arbeitspunkt linearisierten, vereinfachten Modells verlassen und das nichtlineare Modell benutzt (Möglichkeit 3b).

### **Zu Möglichkeit 3a) Iterative Variation und multikriterielle Optimierung der Zielgrößen**

Abbildung 7 zeigt das Verfahrensdigramm für diese Auswertungsmöglichkeit. Zur Ermittlung des Amplituden-  $A(\omega)$  und Phasengangs  $\varphi(\omega)$  werden die transienten Messsignale (Absorber- und Glastemperatur) mit dem Verzögerungsglied- bzw. kleinsten-Quadrate-Verfahren ausgewertet. Davor werden die Temperatursignale von möglichen Trends korrigiert. Temperaturmittelwerte werden ermittelt.  $(\overline{T_{abs,o}}, \overline{T_{gl,o}}, \overline{T_{avr}})$ . Im nächsten Schritt werden die zwei Zielgrößen  $\varepsilon_{abs}$  und  $h_{ann}$  solange optimiert, bis die mit dem numerischen Modell (II.1.1.1) berechneten Größen  $\{A(\omega), \varphi(\omega), \overline{T_{gl,o}}\}_{sim}$  und gemessene Größen  $\{A(\omega), \varphi(\omega), \overline{T_{gl,o}}\}_{meas}$  übereinstimmen. Das Optimierungskriterium ist die Summe der quadratischen relativen Abweichungen. Da verschiedene Größen durch das Optimierungsverfahren reproduziert werden sollen, wird die Fragestellung als multikriterielles Optimierungsproblem bezeichnet.

Da das numerische Modell des Receivers aus AP1.1 (II.1.1.1) verschiedene Nichtlinearitäten umfasst, lässt sich dieses Modell nur näherungsweise linearisieren und entsprechend auch nicht exakt analytisch ableiten. Deswegen wurde eine ableitungsfreie Optimierungsstrategie implementiert. Das Modell wird an eine hybride Optimierungsroutine gekoppelt. Für jede Iteration wird von dieser Optimierungsroutine eine neue Parameterkonstellation definiert und damit das numerische Modell gestartet, die Simulationsergebnisse ausgewertet und das Optimierungskriterium berechnet.



Der Optimierungsalgorithmus besteht aus zwei komplementären Subroutinen und ist daher eine hybride Routine. Der Suchbereich für die Zielgrößen ist beschränkt, um potentiell nichtphysikalische Lösungen auszuschließen. Die erste Routine beruht auf einem Partikelschwarm. Für diese Subroutine wird eine Matrix (Schwarm) von möglichen Zielgrößenvektoren (Partikeln) künstlich generiert. Das Optimierungskriterium wird dann für jedes Partikel evaluiert und für die nächste Iterationen gespeichert.

Das Grundprinzip des Partikelschwarms ist, dass sich der Wert der Partikel nach jeder Iteration innerhalb des definierten Suchbereichs aktualisieren kann. Die Aktualisierung einer einzelnen Partikel summiert zwei gewichtete Vektoren oder Positionen: einerseits wird die bisherige beste Position des Partikels gespeichert ("kognitiver" Wert), andererseits wird auch die bisherige beste Position des Schwarms gespeichert und gewichtet ("sozialer" Wert).

Die Partikelschwarm Subroutine ist ein globaler Suchmechanismus und wird solange iteriert bis möglichst günstige Startwerte für die nächste Subroutine des Optimierungsverfahrens zu liefern. Die zweite Subroutine basiert auf einem für beschränkte Suchbereiche angepassten Downhill-Simplex Verfahren. Diese Subroutine verfeinert die Lösung der Partikelschwarm-Optimierung bis das Abbruch- oder Konvergenzkriterium erfüllt ist.

Trotz der experimentellen Störeinflüsse konnten im Laufe des AP3 sinnvolle Ergebnisse mit den implementierten Auswertalgorithmen für die transienten Signale abgeleitet werden. Während der Feldmesskampagnen des AP5 wurde jedoch festgestellt, dass der Umweg über Amplituden- und Phasengang vor allem bei Messungen unter stärkeren Umwelt-Störeinflüssen (Temperaturgradienten, Windböen) mehr Nachteile als Vorteile bringt und die Möglichkeit 3b wurde entwickelt.

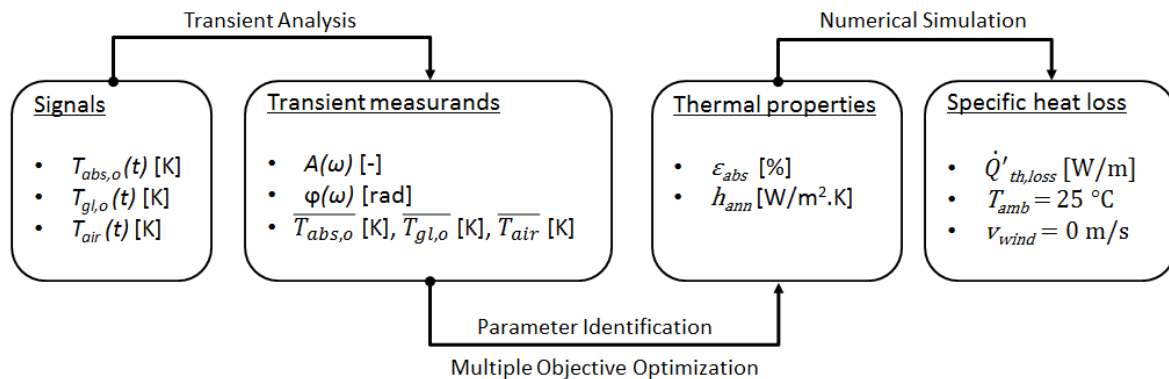
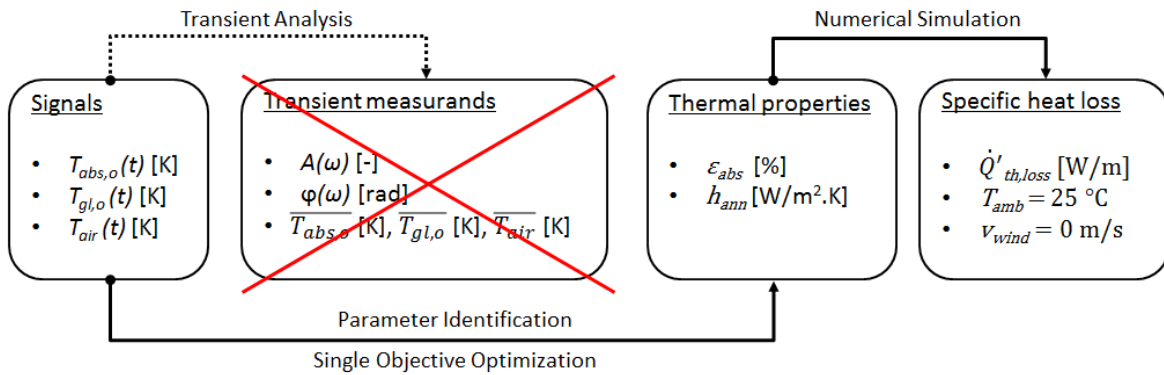


Abbildung 7: Verfahrensdiagramm der multikriteriellen Optimierung der Zielgrößen

### Zu Möglichkeit 3b) Iterative Variation und monokriterielle Optimierung der Zielgrößen

Die Auswerteroutine beruht auf der Lösung eines inversen Wärmeübertragungsproblems (IHTP, *Inverse Heat Transfer Problem*). Bei dieser Möglichkeit werden die experimentell verrauschten Messsignale  $T_{abs,o}(t)$ ;  $T_{gl,o}(t)$  und  $T_{air}(t)$  genutzt, um die Zielgrößen zu bestimmen. Abbildung 8 zeigt das Verfahrensdiagramm dieser Methode. Der Hauptunterschied zur Möglichkeit 3a) liegt in der Formulierung der Optimierungskriteriums. Es wird grundsätzlich auf die explizite Berechnung der Messgrößen  $A(\omega)$  und  $\varphi(\omega)$  verzichtet, während direkt die gemessenen Temperatursignale  $T_{abs,o}(t)$ ;  $T_{gl,o}(t)$  und  $T_{air}(t)$  genutzt werden. Mit dieser direkteren Kopplung zwischen numerischem Modell und experimentellen Messsignalen kann die Auswertungsroutine deutlich vereinfacht werden und die Einschränkungen, welche durch die lineare Systemtheorie verursacht wurden (z.B. konstante Absorber- und Umgebungstemperatur) überwunden werden.



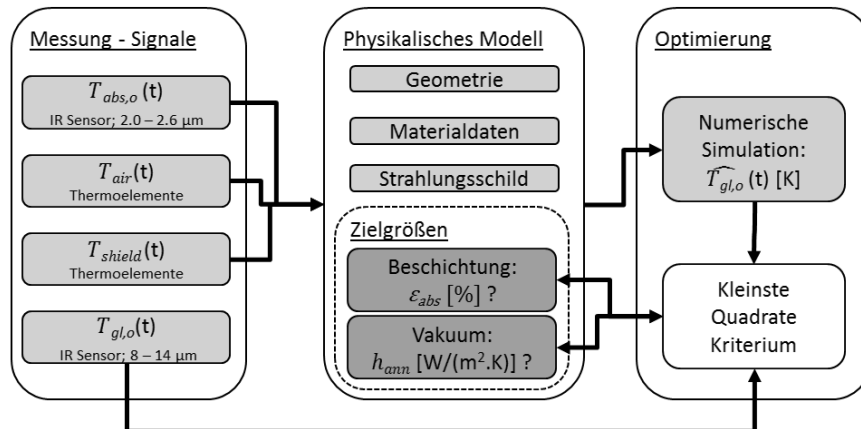


**Abbildung 8: Verfahrensdigramm der monokriterielle Optimierung der Zielgrößen**

Das Prinzip ist weiter in der Abbildung 9 dargestellt. Das Anregungssignal  $T_{abs,o}(t)$ , sowie die „Störsignale“  $T_{air}(t)$  und  $T_{shield}(t)$  werden zusammen mit Startwerten für  $\epsilon_{abs}$  und  $h_{ann}$  an das numerische Modell gegeben, welches die Glastemperatur berechnet. Diese berechnete Glastemperatur wird dann mit dem gemessenen Glastempersignal  $T_{gl,o}(t)$  mit Hilfe der kleinsten Quadrate Methode verglichen. Die Abweichung wird minimiert, indem die nächste Simulation mit aktualisierten Zielgrößen  $\epsilon_{abs}$  und  $h_{ann}$  gestartet wird. Da nur das gemessene Glastempersignal für die Minimierung des Kriteriums reproduziert werden soll, ist das Optimierungsproblem als monokriteriell einzustufen. Es wird analog zu Möglichkeit 3a) eine Partikelschwarm Subroutine mit anschließendem Downhill-Simplex verwendet.

Da die Komplexität des Problems auf nur ein Optimierungskriterium reduziert worden ist, können die Beschränkungen des Suchbereiches flexibler gestaltet und das Risiko für mehrfache optimale Lösungen deutlich reduziert werden. Die Möglichkeit 3b hat sich als die am besten geeignete herausgestellt. Der Nachteil dieses ableitungsfreien, heuristischen Optimierungsalgorithmus bleibt, dass die Konvergenz zur eindeutigen Lösungen nicht analytisch, sondern heuristisch gewährleistet werden kann, ein feines Tuning der internen Optimierungsparameter gegeben sein muss und ein gewisser Rechenaufwand nötig ist.

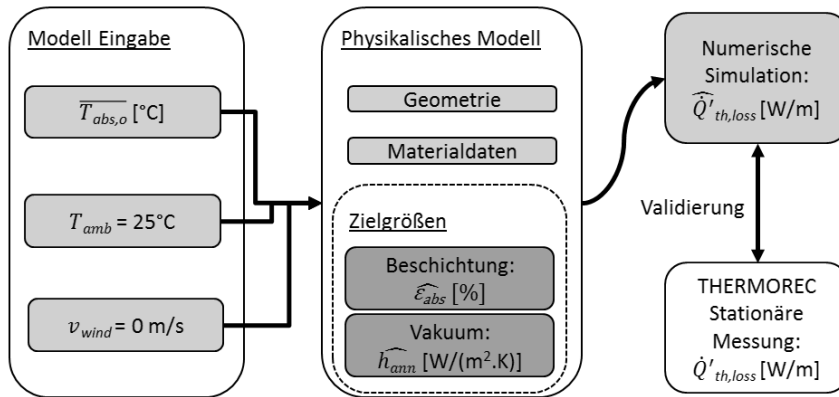
#### Schritt 1: Inverses Wärmeübertragungsproblem



**Abbildung 9: Schematische Prinzip Darstellung des inversen Wärmeübertragungsproblems**

Der abschließende Schritt der Auswertungsroutine berechnet den spezifischen Wärmeverlust  $\dot{Q}'_{loss}$  [W/m] eines Receivers. Das Prinzip ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Die in der Optimierung identifizierten Zielgrößen  $\varepsilon_{abs}$  und  $h_{ann}$  erlauben es für die Randbedingungen Absorbertemperatur  $\overline{T}_{abs,o}$ , Umgebungstemperatur  $T_{amb}$  und Luftgeschwindigkeit  $v_{wind}$  die Receiver-Wärmeverluste  $\dot{Q}'_{loss}$  zu berechnen, welche dann mit Referenzmessungen des ThermoRec-Teststands des DLR-QUARZ-Zentrums verglichen werden können (siehe AP3 und AP5).

Schritt 2: Direktes Wärmeübertragungsproblem



**Abbildung 10: Schematische Prinzip Darstellung des spezifischen Wärmeverlust Schätzung**

## II.1.2. AP2 – Erzeugung von Receiver-Proben und Aufbau des Messstands

Im AP2 werden verschiedene Receiver-Proben spezifiziert und hergestellt, die zur Entwicklung und Validierung des Messverfahrens im Rahmen des AP3 benutzt werden. Zudem wird ein Labor-Teststand, inklusive wiederverwendbaren Stromeinkopplungs-Zangen entwickelt und aufgebaut. Es wird ein Schaltschrank für Labor- und Feldmessungen spezifiziert, aufgebaut und in Betrieb genommen.

### II.1.2.1. Herstellung von Receivern unterschiedlicher Qualität und Vermessung der Glasdaten

#### Receiver-Proben

In Zusammenarbeit mit dem Receiver-Hersteller Archimede Solar Energy (ASE) wurden verschiedene Receiver-Proben definiert, welche neue und degradierte Receiver darstellen sollen. Die zwei entscheidenden Qualitätsmerkmale hinsichtlich des Wärmeverlustes sind der Emissionsgrad der Absorberbeschichtung und der Wärmeübergangskoeffizient im Ringspalt zwischen Absorber- und Glashüllrohr. Vier verschiedene Receiverkategorien, wurden für die in AP3 und AP5 geplanten Messkampagnen definiert und sind in Tabelle 2 beschrieben. Die Receiver haben dieselben Abmessungen wie der ASE Standard-Receiver für Thermoölkraftwerke HCEO12<sup>1</sup>. Das Absorberrohr besteht aus Edelstahl AISI321, hat eine Wanddicke von 2 mm und einen Absorberrohrdurchmesser von 70 mm. Das Glashüllrohr ist mit einer doppelseitig aufgetragenen Antireflex-Beschichtung beschichtet. Abbildung 11 zeigt die gelieferte Receiverkiste und die Receiver mit einem Gasbefüllstutzen.

**Tabelle 2: Auslegung der verschiedenen Kategorien von Receiverproben**

Ringspalt Absorber	Ringspalt ist evakuiert (Zielwert: $< 10^{-4}$ mbar)	Ringspalt nicht evakuiert
<b>Selektive Beschichtung</b>	<u>Kategorie A (Standard Rohr)</u> Anzahl: 3 Proben	<u>Kategorie D (variabler Druck)</u> Anzahl: 2 Proben mit Gasflansch
<b>Hoch emittierende Beschichtung</b>	<u>Kategorie B</u> Anzahl: 3 Proben	<u>Kategorie C (Luftgefüllt, ~1 bar)</u> Anzahl: 3 Proben

Für die Receiverproben der Kategorien B und C werden zwei hochtemperaturbeständige, hoch-emittierende, schwarze, nicht selektive, matte Lacke für ihren Einsatz zur Beschichtung des Absorberrohrs untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist, eine nichtselektive Beschichtung auszuwählen, welche ihre optischen Eigenschaften unter Erhitzung nicht ändert. Pyromark 2500 und Senotherm UHT 600 Lacke werden gewählt und auf AISI321 Stahl-Proben aufgebracht. Die beschichteten Proben werden im Ofen nach folgendem Plan künstlich gealtert:

- Alterungstest 1: Alterung im Ofen; Erhitzungsrampe von 200°C bis 550°C innerhalb von 22 Minuten, dann Heizung bei 550°C für 60 Minuten, davor und danach spektrale Reflektivitätsmessung mit einem FTIR Spektrometer (Perkin Elmer System 2000, 2.5 µm bis 15 µm)
- Alterungstest 2: Alterung im Ofen bei 550°C für 180 Minuten, danach spektrale Reflektivitätsmessung mit dem FTIR Spektrometer

<sup>1</sup> <http://www.archimedesolarenergy.it/hceoi12.pdf>

Der Emissionsgrad der verschiedenen Proben wird vor und nach den Alterungstests im DLR auf Basis der spektralen Reflektivitätsdaten und des Planckschen Strahlungsgesetzes berechnet.

Nach Untersuchung der beiden Lacke wird Senotherm UHT 600 für die Beschichtung des hochemittierenden Absorberrohres ausgewählt. Im Gegensatz zu Pyromark 2500 kann dieser Lack ohne Verdünnung angewendet werden. Zusätzlich wird keine Ausgasung des Senotherm UHT 600 Lackes beobachtet, während bei den mit Pyromark 2500 beschichtete Stahlproben eine leichte Abdunkelung nach dem ersten Alterungstest beobachtet wird. Zudem werden für Senotherm UHT 600 beschichtete Stahlproben durchschnittlich höhere Emissionsgrade (~86.5%) im Vergleich zu Pyromark 2500 beschichteten Stahlproben (~80%).

Die mit Senotherm UHT600 beschichteten Proben wurden nach dieser Messkampagne zu ASE geschickt, um eine Validierungsmesskampagne der optischen Eigenschaften durchzuführen. Die mittlere Abweichung der im DLR und bei ASE gemessenen Emissionsgrade liegen bei +0.7%.

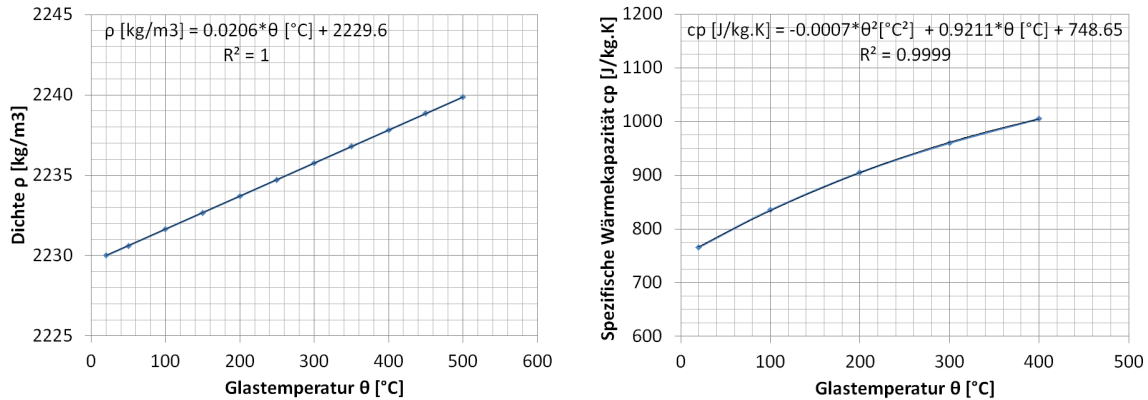
Für die Receiverproben der Kategorie D wird in Zusammenarbeit mit ASE ein Konzept für die Befüllung des Ringspalts mit verschiedenen Gasen entwickelt. Mit verschiedenen Gasbeladungen ist es möglich, Rohre nachzubilden, welche ihr Vakuum verloren haben.



**Abbildung 11: ASE Receiverkiste (links). Receiver mit Gasbefüllstutzen (rechts).**

### Borosilikat-Glas-Daten

Die temperaturabhängige Dichte und spezifische Wärmekapazität des Borosilikat-Glasmaterials des Glasherstellers *Kavalierglass* sind in Abbildung 12 dargestellt. Diese Daten werden im numerischen Modell des AP1.1 (II.1.1.1) verwendet. Zusätzlich sind Glasmaterialproben zur Kalibration der Glasdickenmessung geliefert worden. Dazu kommunizierte die Firma ASE vertrauliche optische Stoffdaten, u.a. die spektrale Transmissivität des Borosilikatglas mit AR Beschichtung von 300 nm bis 2500 nm und die spektrale Emissivität einer selektiven Beschichtung.



**Abbildung 12: Thermophysikalischen Daten für Borosilikatglas des Herstellers Kavalierglass, Dichte (links), spezifische Wärmekapazität (rechts)**

#### II.1.2.2. Beschaffung der Messsensoren und Peripherie

Ein Labor-Teststand zur Entwicklung des transienten thermographischen Messverfahrens wird entworfen und aufgebaut (Abbildung 13). Ein Implosionsschutz aus Plexiglasplatten ist aus Sicherheitsgründen gegen mögliche Glassplitter integriert.



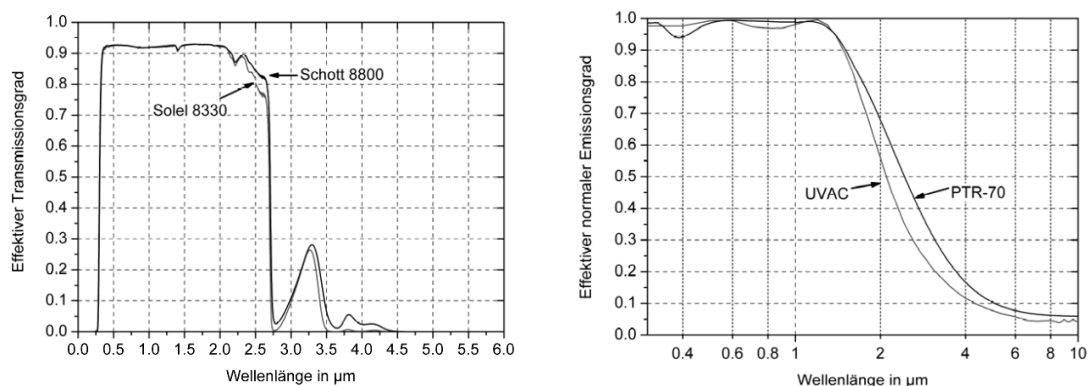
**Abbildung 13: Labor Teststand zur thermischen Vermessung von Parabolrinnen Receiver (ohne montierten Receiver).**

## Infrarot Messtechnik

Die Anforderungen hinsichtlich Spektralmessbereich und Temperaturmessbereich der Infrarot-Sensoren zur Temperaturmessung von Absorber- und Glashüllrohr werden spezifiziert.

Die Temperatur des Absorberrohres soll durch das Glashüllrohr gemessen werden. Der vorge-sehene Temperaturmessbereich des Absorberrohres liegt zwischen 100°C und 400°C. Der Transmissionsgrad von Borosilikat-Glas fällt ab 2.7  $\mu\text{m}$  signifikant (Abbildung 14, links). Andererseits sinkt der Emissionsgrad der selektiven Beschichtung zwischen 1.5  $\mu\text{m}$  bis 4  $\mu\text{m}$  (Abbildung 14, rechts).

Der Temperaturmessbereich des Glashüllrohrs liegt im Bereich von Umgebungstemperatur, standardmäßig zwischen 20-25°C, bis maximal 250-300°C für einen degradierten Receiver mit hoch emittierender Absorber Beschichtung und/oder mit Wasserstoff gefülltem Ringspalt. Die Glashüllrohrtemperatur soll in einem Spektralbereich gemessen werden, indem der Emissionsgrad möglichst hoch ist (Transmissionsgrad gleich null und Reflexionsgrad am niedrigsten).



**Abbildung 14: Spektraler effektiver Transmissionsgrad von Borosilikat Glas Typ 8830 für Solel UVAC und Typ 8800 für Schott PTR-70 Receiver (links). Effektiver Emissionsgrad der Solel UVAC und Schott PTR-70 Absorberrohrbeschichtungen (rechts). Quelle: [Pfähder 2006].**

Zusätzlich werden weitere Kriterien berücksichtigt. Da die Entwicklung eines transienten Messverfahrens vorangetrieben werden soll, spielt die Dynamik des Temperatursignals eine wichtige Rolle. Deswegen sollten beide Pyrometer über eine minimale Einstellzeit verfügen, aber gleichzeitig auch ein minimales Signal-Rausch-Verhältnis (NETD, Noise Equivalent Temperature Difference) zeigen. Zudem sollte der Emissionsgrad von beiden Pyrometern mit einer feinen Auflösung von min. 0,1% eingestellt werden können. Zusätzlich sollte die Messunsicherheit minimal und die Reproduzierbarkeit von beiden Messgeräten maximal sein.

Schließlich muss auch die Optik der beiden Infrarot-Pyrometer berücksichtigt werden. Die Temperatur des Absorber- und Glashüllrohrs müssen durch einen Strahlungs-Reflexionsmantel (AP 2.3, II.1.2.3) gemessen werden. Die Durchmesser der entsprechenden Öffnungen, die im Strahlungs-Reflexionsmantel vorgesehen sind, müssen mit der Optik von beiden Pyrometern kompatibel sein. Zusätzlich sollten die Durchmesser der projizierten Messflecken auf den zylindrisch gekrümmten Messoberflächen von Absorber- und Glashüllrohr nicht zu groß sein.

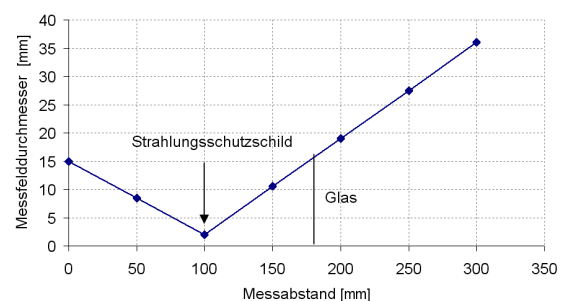
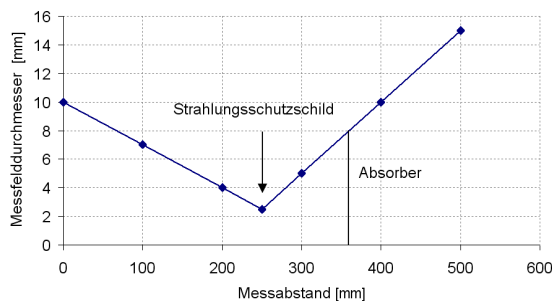
Auf Basis der oben gelisteten Kriterien werden zwei Pyrometer bei der Firma Dias Infrared Systems für die Labormesskampagne beschafft. Für die Absorber-Temperaturmessung wurde der Pyrometer DGE 10N und für das Glashüllrohr der Pyrometer DT44LH ausgewählt.



Die technischen Spezifikationen der Messgeräte sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Optische Messfelddiagramme sind in Abbildung 15 dargestellt.

**Tabelle 3: Spezifikationen für die ausgewählte Infrarot Pyrometer. Für die Messunsicherheit, Reproduzierbarkeit und das Signal-Rausch-Verhältnis gelten die folgenden Randbedingungen: Umgebungstemperatur: 23°C, Emissionsgrad: 100%;  $t_{95} = 1s$ .**

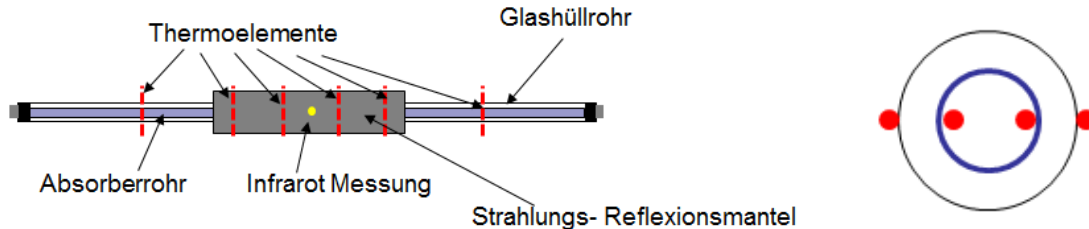
Pyrometer Identifikation	DGE 10N	DT 44LH
Messtemperaturbereich	100 °C bis 850 °C	0 °C bis 1000 °C
Teilmessbereich	Mindestumfang. 50°C	Mindestumfang. 50°C
Spektralbereich	2,0 $\mu\text{m}$ bis 2,6 $\mu\text{m}$ (Absorber durch Glas)	8 bis 14 $\mu\text{m}$ (Glasrohr)
Optik	Variooptik	Festoptik Typ V
Aperturdurchmesser	D = 10 mm	D = 15 mm
Distanzverhältnis (Messabstand / Messfelddurchmesser)	100 : 1 Messabstand : 250 mm Messfeld: $\varnothing$ 2,5 mm	50 : 1 Messabstand : 200 mm Messfeld: $\varnothing$ 2,0 mm
Messunsicherheit	0,5% vom Messwert + 2 K	0,6% vom Messwert oder 1 K, größter Wert bevorzugt
Reproduzierbarkeit	0,3% vom Messwert + 1K	0,3% vom Messwert oder 1 K, größter Wert bevorzugt
Signal-Rausch-Verhältnis (NETD)	0,5°C	0,1 °C
Einstellzeit	$t_{95}$ : min. 2 ms, bis 10 s	$t_{90}$ : min. 10 ms, bis 100 s
Emissionsgrad	5,0% bis 100% 0,1% Auflösung	20,0% bis 100% 0,1% Auflösung
Visiereinrichtung	LED Pilotlicht	LED Pilotlicht
Ausgang	0/4 bis 20 mA Temperaturlinear	0/4 bis 20 mA Temperaturlinear
Schnittstelle	RS-485, halbduplex	RS-485, halbduplex
Schutzart	IP65 (nach DIN 40 050)	IP65 (nach DIN 40 050)



**Abbildung 15: Optisches Messfelddiagramm der Pyrometer. Pyrometer DGE 10N, Optikauszug 14,2 mm, Absorberrohr (links). Pyrometer DT44LH, Optik V, Glashüllrohr (rechts).**

Zur Kalibrierung der beiden Pyrometer werden Mantelthermoelemente des Typs K, Klasse 1 eingesetzt. Während der Labormessungen werden die Mantelthermoelemente mittels Edelstahl-Federblechen auf die innere Seite des Absorberrohrs gedrückt. Mantelthermoelemente werden mit Rohrschellen auf der äußeren Fläche des Glashüllrohrs befestigt.

Die Positionierung der insgesamt 24 Thermoelemente (6 Messebenen, pro Messebene sind je zwei Sensoren für das Absorber- und zwei für Glashüllrohr gelegt) ist in Abbildung 16 dargestellt. Zusätzlich werden weitere Thermoelemente zur Überwachung der Umgebungs-, Luft-, und Strahlungsreflexions-Mantel-Temperaturen installiert.



**Abbildung 16: Positionierung der Mantelthermoelemente zur IR-Temperaturmessung. In Längsrichtung (links), im Querschnitt (rechts).**

Für Labor- und Feldmessungen sind zwei unterschiedliche Datenerfassungskonzepte notwendig. Für Labormessungen werden die Receiverproben zur Beheizung mit Stromekopplungen an einem Transformator angeschlossen (Joulesche Effekt). Ein Schaltschrank zur Steuerung des Transformators inkl. Temperaturmesskanälen war bereits aus dem QUARZ-Projekt verfügbar. Ein zweiter Schaltschrank wird im Rahmen von PARESO für Labor- und hauptsächlich Feldmessungen aufgebaut. An diesem Schaltschrank werden die zwei Pyrometer und die zusätzlichen Thermoelemente angeschlossen.

Für Feldmessungen werden die Thermoelemente in anderer Weise angeordnet, da die innere Oberfläche des Absorberrohres ohne großen Aufwand für ein mobiles Messsystem nicht mehr zugänglich ist. Diese verfügbaren Thermoelemente werden dann im Feld zur Kontrolle der Temperaturen von Luft und Strahlungs-Reflexionsmantel eingesetzt.

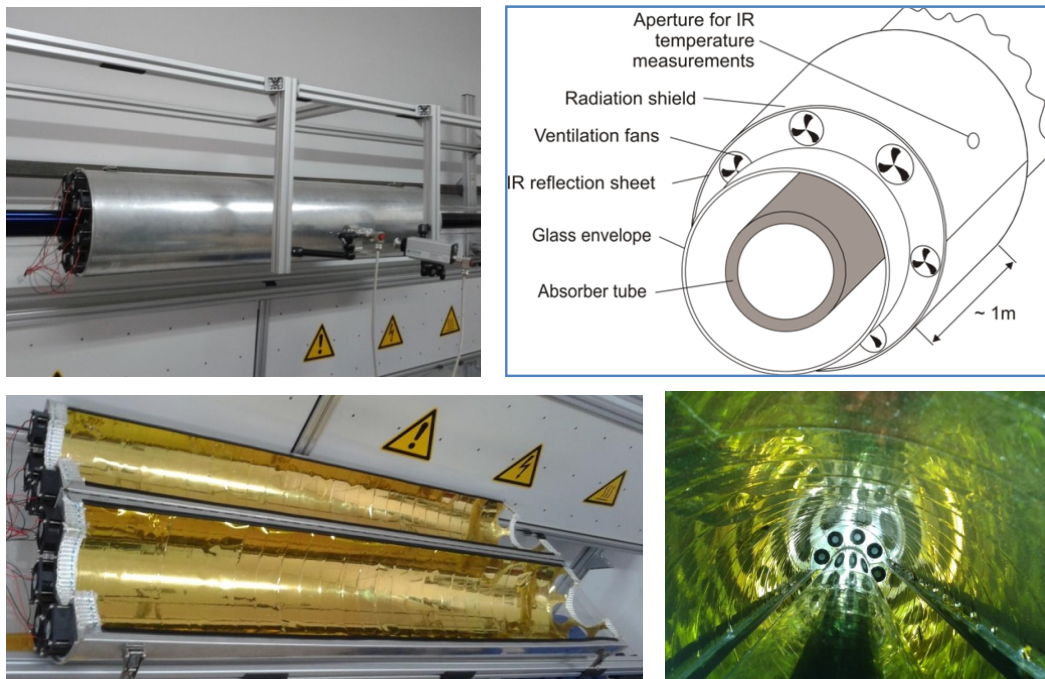
Drei Datenerfassungsmodule mit jeweils 8 Kanälen und Kaltstellen-Kompensation (Gantner Q.bloxx A104) dienen zum Anschluss der Thermoelemente und ein universales Eingabemodul mit 4 analogen Kanälen (Gantner Q.bloxx A107) zum Anschluss der analogen Signale der IR-Pyrometer. Diese Module sind über einen Gantner Qpac DL Controller über eine RS485 Bus verbunden. Im Betrieb kommunizieren beide Schaltschränke über eine Ethernet Schnittstelle mit einem Messrechner. Für Feldmessungen kann das Netzwerk mit einem W-LAN Modul benutzt werden.

Für Labor- und Feldmessungen muss die Dicke des zu untersuchenden Glashüllrohres mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Für die zerstörungsfreie Messung der Glashüllrohr-Dicke eines im Solarfeld montierten Receivers wurde ein Präzisions-Ultraschall-Wanddickenmessgerät TI-PVX mit einer stiftförmigen Messfläche ausgesucht. Zu dessen Kalibrierung werden kleine Glassegmente verwendet, deren Dicke mechanisch mit einer digitalen Bügelmessschraube mit balliger Messfläche ( $R = 5 \text{ mm}$ ) vermessen wird.



### II.1.2.3. Design und Bau des Strahlungs-Reflexionsmantels mit Peripherie

Ein erster Prototyp des Strahlungs-Reflexionsmantels wurde im Rahmen des QUARZ Projekts aufgebaut. Auf Basis dieses Prototyps wird im Rahmen des Projekts PARESO eine neue Version entworfen und aufgebaut. In Abbildung 17 sind das Konzept des Mantels und der Aufbau dargestellt. Dieser Mantel wird um den zu untersuchenden Receiver geschlossen. Auf Höhe der Symmetrieachse des Receivers befinden sich in der Mitte des Mantels zwei kleine Öffnungen welche die optische Zugänglichkeit für die beiden Pyrometer schaffen.



**Abbildung 17:** Um einen Receiver geschlossener Strahlungs-Reflexionsmantels (links, oben). Schematischer Aufbau des Strahlungs-Reflexionsmantels [Röger 2014] (rechts, oben). Infrarot reflektierende Folie und Lüftungssystem (links, unten). Innensicht des um einen Receiver geschlossenen Strahlungs-Reflexionsmantels (rechts, unten).

Der Strahlungs-Reflexionsmantel besteht aus zwei zylindrischen Aluminium Halbschalen mit einem auf Scharnieren basierten Verschlusssystem. Die geometrischen Abmessungen des Mantels sind:

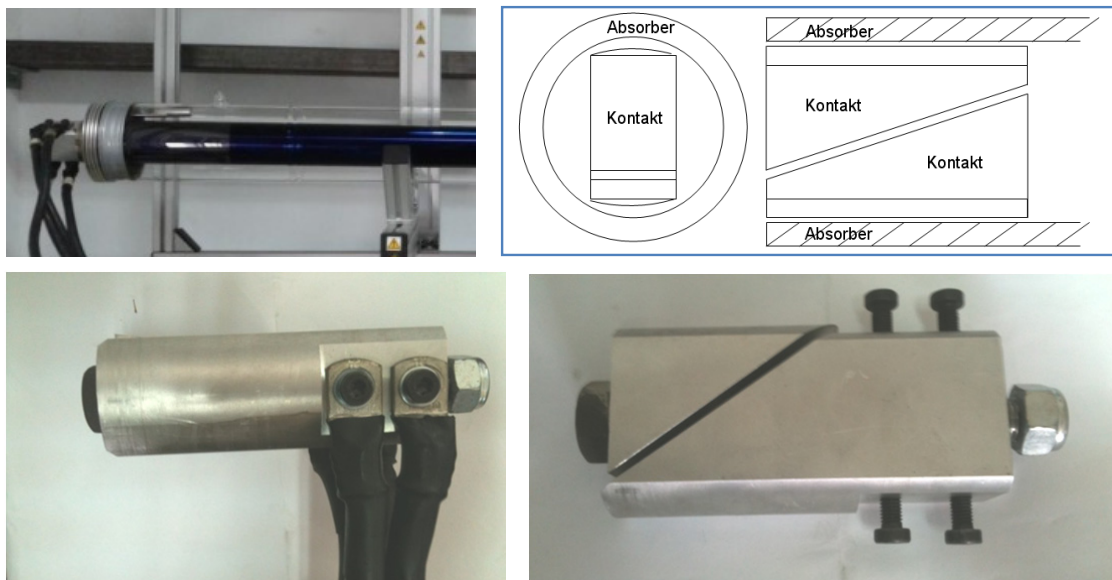
- Innendurchmesser des stirnseitigen Blechen: 136 mm
- Außendurchmesser des Mantels: 290 mm
- Reflexionsmantel: 1350 mm

Die longitudinalen Kanten des Blechmantels sind zum Schutz des Glashüllrohres bei der Montage abgeklebt. Die Kanten der stirnseitigen Bleche werden mit Glasfaserband isoliert, um die Wärmeleitung zwischen dem Glashüllrohr und dem Mantel zu verringern und lüfterseitig eine Kurzschlussströmung zu verhindern.

Auf der inneren Fläche des Mantels wird eine Infrarot reflektierende PET-Folie verklebt, welche die vom Glashüllrohr emittierte Strahlung auf den Receiver zurückwirft ([Röger 2014]). Auf der Stirnseite des Schildes sind acht Lüfter befestigt, um einen Hitzestau innerhalb des Reflexionsmantels zu vermeiden. Über ein Labornetzgerät kann die Spannung und damit die Leistung der Lüfter eingestellt werden. Das Lüftungssystem wird im AP5 weiter für Feldmessungen angepasst.

#### II.1.2.4. Design und Bau von wiederverwendbaren Stromeinkopplungs-Zangen

Zur Einspeisung der elektrischen Spannung in das Absorberrohr wurden bisher Platten an die Receiver geschweißt. Dadurch waren die Rohre nach einer Messung nicht mehr verwendbar. Um die Beheizung zu vereinfachen, werden für Labormessungen wiederverwendbare Kontaktklemmen entworfen, gebaut und auf Funktion geprüft. Diese Kontaktklemmen sind in Abbildung 18 dargestellt. Die Klemmen werden über die beiden Stirnseiten eines Receivers in das Absorberrohr eingeführt, über einen Mechanismus flächig verklemt und können dann an den Transformator angeschlossen werden.



**Abbildung 18:** Receiver mit eingebauten Stromeinkopplungs-Zangen für Labormessungen (links, oben). Konzeptskizzen einer Stromeinkopplungs-Zange, Ansichten Stirnseite und Querschnitt (rechts, oben). Ansicht von oben mit montierten Kabeln (links, unten). Seitenansicht ohne Kabel (rechts, unten).

### II.1.3. AP3 – Thermische Vermessung und Validierung im Labor

Ziel des AP3 ist das transiente Messverfahren unter Laborbedingungen zu entwickeln, zu optimieren und schließlich im Labor mit Hilfe von stationären Referenzmessungen am ThermoRec-Teststand des DLR QUARZ<sup>®</sup>-Zentrum zu validieren. Hierzu werden je drei Proben der Receiver der Kategorien A, B und C (Tabelle 2, S. 15) verwendet.

Zwei unterschiedliche transiente thermische Anregungen werden im Labor verwendet. In einer ersten Phase werden die Receiver mit einer sinusförmigen Anregung getestet (AP3.1, II.1.3.1), in einer zweiten Phase mit einer rampenförmigen Anregung ähnlich wie im Solarfeld (AP3.2, II.1.3.2). Um die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmeverluste abbilden zu können, werden nacheinander drei verschiedene Absorbertemperaturen angefahren. Insgesamt wurden mehr als 100 Versuche durchgeführt, zwei Drittel davon mit sinusförmigen Anregungen und ein Drittel mit nicht-sinusförmigen Anregungen. Die Ergebnisse der transienten Messungen werden mit Messergebnissen des DLR ThermoRec-Teststandes validiert (AP3.3/3.4, II.1.3.3).

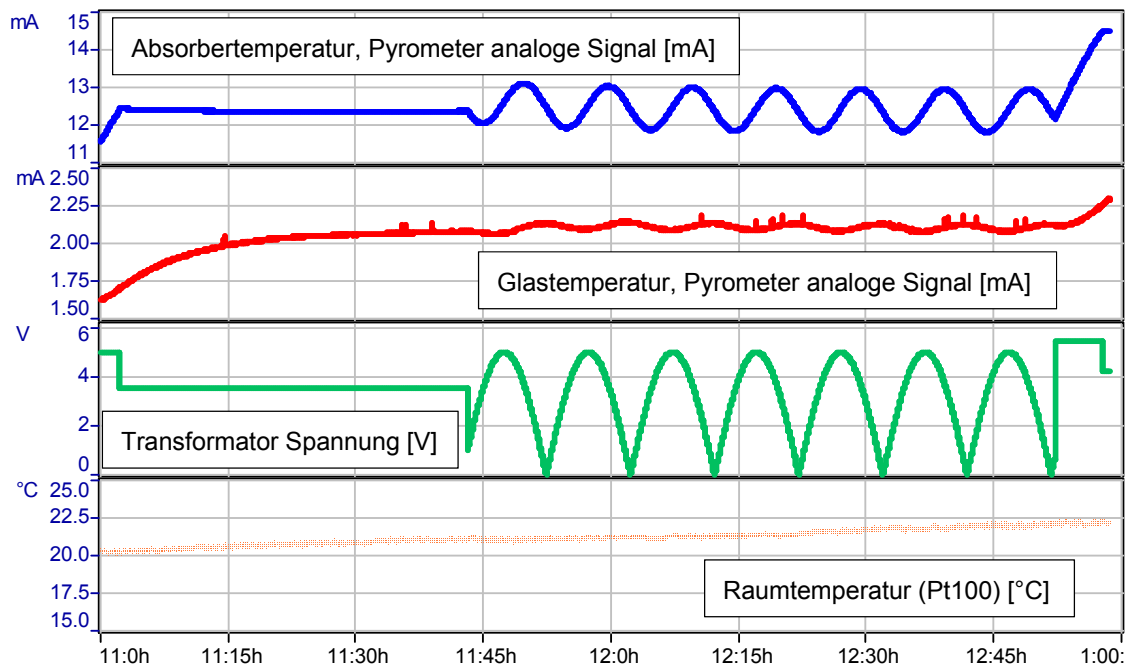
#### II.1.3.1. Messungen mit sinusförmiger Anregung

Die Inbetriebnahme des Labor-Teststandes erfolgt mit einem Receiver der Kategorie A unter Nutzung einer sinusförmigen Anregung. Hierbei werden folgende Aspekte untersucht und optimiert:

- Festlegung von Offset und Amplitude der elektrischen Anregung bei unterschiedlichen Absorbertemperaturen, so dass die Absorberrohr-Temperaturamplitude zwischen 10 und 15 K bleibt.
- Festlegung von Kreisfrequenz auf  $2\pi/600$  Hz (Default Wert aus AP1.2, II.1.1.2) und Anzahl der Perioden (optimale Einstellung: 6 Zyklen, 1 Stunde)
- Minimale Wartezeit für quasi-stationäre Infrarot Temperatursignale und Entwicklung der Trendkorrekturen für Temperaturdrifts (mindestens 30 min, je nach Receiver Qualität)
- Unterbindung der Störeinflüsse auf das Glaspyrometer, besonders die physikalische Abschirmung des Messgeräts gegen die elektromagnetische Störung durch den 10 kVA Transformator und das Filtern von zufälligen Peaks (Abbildung 19).
- Online Kalibration der Emissionsgrade von Absorberrohr und Glashüllrohr-Pyrometer auf Basis der entsprechenden Thermoelementen unter Berücksichtigung von möglichen schlechten thermischen Kontakten (Federklemmen im Absorberrohr, Wärmeleitpaste am Glashüllrohr).
- Manuelle Steuerung des Labornetzgeräts und Einstellung der Leistung des Lüftungskreis des Strahlungs-Reflexionsmantel zur Unterbindung eines Hitzestaus.

Ein typischer Datensatz für einen sinusförmigen Messzyklus ist in Abbildung 19 dargestellt.

Receiver der Kategorie A werden für drei Absorbertemperaturen zwischen 350°C und 450°C vermessen, während die Receiver der Kategorie B und C an drei Arbeitspunkten zwischen 185°C und 275°C vermessen werden. Die maximale Temperatur liegt hier aufgrund der deutlich höheren Verlustleistung und Glashüllrohrtemperaturen deutlich niedriger. Messungen mit sinusförmiger Anregung sind zuerst mit dem "Sinus" Messverfahren mit Trendkorrektur (Abbildung 6) und danach mit der Möglichkeit 3a ausgewertet worden (AP1, Seite 11).



**Abbildung 19: Beispiel einer Messung mit sinusförmiger Anregung. Das Absorberrohr wird kurz nach 11:00h auf einen neuen Arbeitspunkt hochgeheizt. Ab ca. 11:30 h erreichen die Absorber- und Glastemperaturen Quasi-Stationarität und das Experiment beginnt. Die sinusförmige Anregung wird ab 11:45h aufgebracht.**

Die Ergebnisse der Messkampagne, ausgewertet mit der Möglichkeit 3a, sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Für alle Receiverkategorien wird beobachtet, dass der Amplitudengang mit der mittleren Absorbertemperatur steigt, während der Betrag der Phasenverschiebung sinkt. Diese Beobachtungen können mit dem numerischen Modell bestätigt werden.

Der Amplitudengang ist wie erwartet für Receiver der Kategorie A kleiner als für Receiver der Kategorien B und C. Die Phasenverschiebung nimmt für schlechte Receiver (Kat. B und C) betragsmäßig ab im Vergleich mit guten Receiver (Kat. A). Die Receiver der Kat. C zeigen gegenüber Receiver der Kat. B nur einen leicht höheren Amplitudengang, bzw. eine leichte absolute niedrigere Phasenverschiebung. Der Unterschied liegt daran, dass die Receiver der Kat. B (teilweise) evakuiert sind, die der Receiver der Kat. C aber nicht. Allerdings hat die Evakuierung der Sonderreceiver der Kat. B offensichtlich nicht vollständig auf das Vakuumniveau der Standardreceiver (Kat. A) funktioniert bzw. ist nicht von Dauer gewesen (evtl. verursacht durch Ausgasungsvorgänge des schwarzen Lackes). In den drei Proben der Kategorie B wurde ein Receiver als Ausreißer identifiziert, was die Qualität und Homogenität der Evakuierungsverfahren für die Receiver der Kat. B in Frage stellt.

Das quadratische Mittel der  $2\sigma$ -Standardabweichung der in Tabelle 4 dokumentierten Amplitudengänge  $A(\omega)$  aller drei Arbeitspunkte liegt bei 0.012 [-]. Das quadratische Mittel der  $2\sigma$ -Standardabweichungen der Phasenverschiebungen  $\varphi(\omega)$  liegt bei 0.03 rad. Die Phasenverschiebung liegt leicht über den aus dem AP1 vorgesehen  $2\sigma$ -Fehlerschranken (0.02 rad), der Amplitudengang liegt innerhalb (0.002). Das quadratische Mittel der  $2\sigma$ -Standardabweichungen der Glastemperatur aller drei Arbeitspunkte liegt bei 7.4 K.

**Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Messkampagne mit sinusförmigen Anregungen.** Für jede Messgröße werden pro Receiver, Kategorie und Arbeitspunkt ein Mittelwert und eine Standardabweichung ermittelt. (\*)Für die Kategorie B wurde ein Receiver als Ausreißer identifiziert. Die Ergebnisse für Kat B. werden daher nur über zwei Receiver gemittelt.

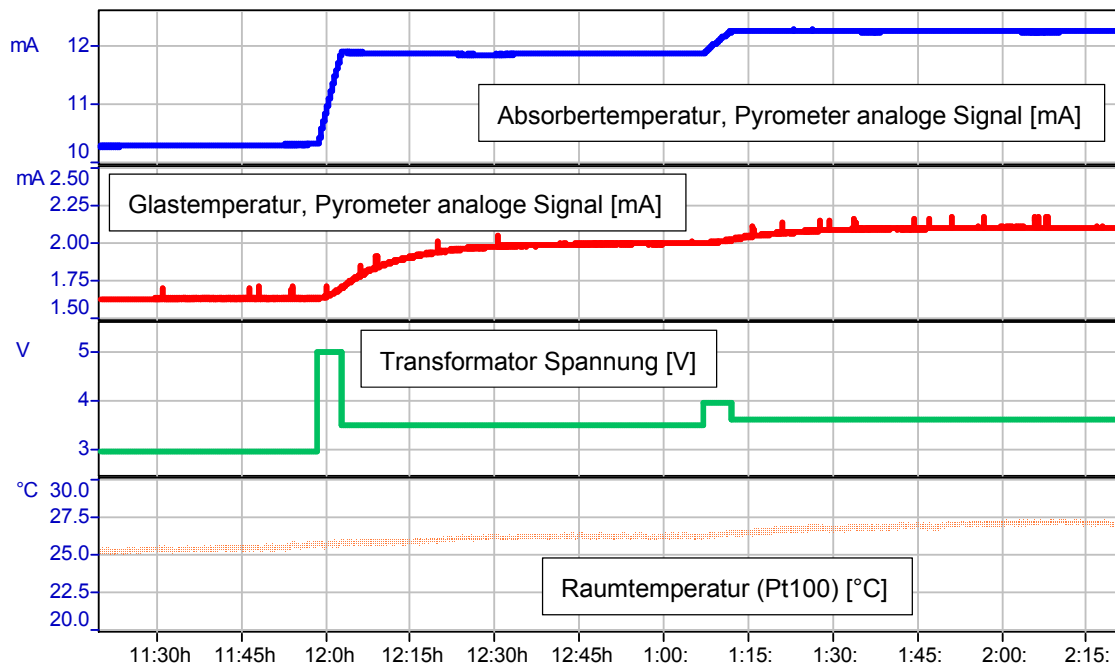
Elektrische Heizleistung	Messgröße	Einheit	Kategorie A selektiv / evakuiert		Kategorie B (*) schwarz / nur teilweise evakuiert		Kategorie C schwarz / Luft	
			Mittelwert	$2\sigma$	Mittelwert	$2\sigma$	Mittelwert	$2\sigma$
Arbeitspunkt 1	$T_{abs,o}$	[°C]	359.4	-	191.4	-	193.2	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	81.9	10.0	110.4	6.8	114.7	7.8
	$T_{air}$	[°C]	26.7	10.6	29.9	3.1	28.9	8.4
	$A(\omega)$	[-]	0.055	0.007	0.168	0.010	0.187	0.021
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.42	0.02	-1.34	0.03	-1.32	0.02
Arbeitspunkt 2	$T_{abs,o}$	[°C]	411.8	-	230.8	-	232.4	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	104.3	7.5	136.9	7.7	141.6	7.2
	$T_{air}$	[°C]	29.9	8.4	35.7	3.0	34.2	7.6
	$A(\omega)$	[-]	0.074	0.005	0.194	0.005	0.211	0.016
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.40	0.08	-1.31	0.02	-1.29	0.01
Arbeitspunkt 3	$T_{abs,o}$	[°C]	457.8	-	272.2		271.8	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	128.1	6.1	166.8	5.5	169.7	6.7
	$T_{air}$	[°C]	34.6	8.2	42.9	3.3	41.2	7.5
	$A(\omega)$	[-]	0.090	0.006	0.221	0.009	0.237	0.017
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.40	0.03	-1.29	0.00	-1.25	0.02

### II.1.3.2. Messungen mit nicht-sinusförmiger Anregung

Da eine sinusförmige Anregung im Solarfeld in der Regel ohne elektrische Beheizung nicht realisierbar ist, wird in AP 3.2 ein Verfahren mit nicht-sinusförmiger Anregung entwickelt. Diese nicht-sinusförmige Anregung wird so gewählt, wie sie auch in einem Solarfeld erzeugt werden kann.

Auf Basis der theoretischen Arbeiten (AP 1.2, II.1.1.2) und der experimentellen Arbeiten mit sinusförmiger Anregung (AP 3.1, II.1.3.1) wird für die Labormesskampagne eine rampenförmige Anregung definiert. Ein typischer Messdatenauschnitt für einen nicht-sinusförmigen Messzyklus ist in Abbildung 20 dargestellt. Zuerst wird die Absorbtemperatur stabilisiert. Für eine auswertbare Messung ist es wichtig, dass die Absorber- und Glas- Temperaturen während dieser Phase so gut wie möglich stationär bleiben. Im Gegensatz zu sinusförmigen Messungen ist eine Trendkorrektur der Messungen deutlich aufwändiger. Dann wird der Absorber mit einem konstanten Heizpuls 5 Minuten angeregt, damit die Absorbtemperatur sich rampenförmig um ca. 10 K erhöht. Die Absorbtemperatur wird danach an einer zweiten Ebene stabilisiert, in der sich als Folge unter der Voraussetzung konstanter Raumtemperatur auch die Glastemperatur asymptotisch an ihren stationären Endwert annähert. Nach der Rampe werden für jeden Arbeitspunkt die Daten während minimal einer Stunde gespeichert. Danach wird ein neuer Arbeitspunkt für den Receiver gemessen und die beschriebene Prozedere wiederholt.





**Abbildung 20: Beispiel einer Messung mit einer nicht-sinusförmigen Anregung. Das Absorberrohr wird ab 12:00 auf einen neuen Arbeitspunkt geheizt. Ab ca. 12:45 erreichen die Absorber- und Glastemperaturen Quasi-Stationarität und das Experiment beginnt. Der Heizpuls findet zwischen 13:05 und 13:10 statt. Nach der transienter Anregung stabilisieren sich die Absorber- und Glastemperaturen wieder ab ca. 13:55.**

Messungen mit nicht-sinusförmiger Anregung sind zuerst mit der Kombination aus dem „Verzögerungsglied-Verfahren“ und der Möglichkeit 3a ausgewertet worden. (siehe AP1, Seite 11-12). Zu einem späteren Zeitpunkt sind die Auswertung mit der Möglichkeit 3b wiederholt worden (ohne Notwendigkeit der Nutzung des „Verzögerungsglied-Verfahrens“). Die hier präsentierten Ergebnisse der nicht-sinusförmigen Messungen sind mit der Möglichkeit 3b erstellt, welche die besten Ergebnisse liefert.

Damit die Ergebnisse von beiden Messkampagnen miteinander vergleichbar sind, werden die Messkampagne mit nicht-sinusförmiger Anregung auf Basis der vorherigen Messkampagne mit sinusförmiger Anregung durchgeführt. Dieselben Receiver werden an ähnlichen Arbeitspunkten unter Nutzung derselben experimentellen Einstellungen vermessen.

Für die Datenvorbereitung wurden die folgenden Punkte beachtet:

- Unterdrückung des Glastemperatur-Rauschens mittels Glättungsfunktionen
- Auswahl des Startpunkts für die Normierung der Absorber- und Glastemperaturprofile
- Auswahl des Endpunkts für die Berechnung des Amplituden- und Phasengänge
- Optimierung der statistischen Robustheit des Auswertungs-Werkzeugs

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefasst. Amplituden- und Phasengänge verhalten sich analog zu der Messkampagne mit sinusförmiger Anregung. Das quadratische Mittel der der  $2\sigma$ -Standardabweichungen der in Tabelle 5 dokumentierten Amplitudengänge  $A(\omega)$  aller drei Arbeitspunkte liegt bei 0.015 [-]. Das quadratische Mittel der  $2\sigma$ -Standardabweichungen der Phasenverschiebungen  $\varphi(\omega)$  liegt bei 0.01 rad. Beide Werte liegen nun innerhalb der aus dem AP1 vorgesehen  $2\sigma$ -Fehlerschranken (0.002 [-] bzw. 0.02 rad). Die Messungen mit nicht-sinusförmiger Anregung funktionieren also gut.

Das quadratische Mittel der  $2\sigma$ -Standardabweichungen der Glastemperatur liegt bei 4.8 K. Die experimentelle Reproduzierbarkeit wurde während diese Messkampagne leicht verbessert.

**Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Messkampagne mit nicht-sinusförmigen Anregungen. Für jede Messgröße werden pro Receiverkategorie und Arbeitspunkt ein Mittelwert und eine Standardabweichung ermittelt. Die Amplituden- und Phasenwerte sind für die Kreisfrequenz  $2\pi/600$  rad/s berechnet. (\*) Für die Kategorie B wurde ein Receiver als Ausreißer identifiziert. Die Ergebnisse werden für Kat. B daher nur über zwei Receiver gemittelt.**

Elektrische Heizleistung	Messgröße	Einheit	Kategorie A selektiv / evakuiert		Kategorie B schwarz / nur teilweise evakuiert		Kategorie C schwarz / Luft	
			Mittelwert	$2\sigma$	Mittelwert	$2\sigma$	Mittelwert	$2\sigma$
Arbeitspunkt 1	$T_{abs,o}$	[°C]	359.4	-	191.4	-	193.2	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	83.4	3.2	110.1	5.7	115.0	5.2
	$T_{air}$	[°C]	29.0	1.7	33.0	0.8	32.5	4.2
	$A(\omega)$	[-]	0.059	0.010	0.169	0.003	0.181	0.019
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.43	0.02	-1.31	0.011	-1.30	0.01
Arbeitspunkt 2	$T_{abs,o}$	[°C]	411.8	-	230.8	-	232.4	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	106.7	3.7	136.8	4.8	142.0	4.9
	$T_{air}$	[°C]	32.9	1.9	38.0	1.4	37.8	3.4
	$A(\omega)$	[-]	0.076	0.007	0.189	0.017	0.210	0.027
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.42	0.01	-1.29	0.00	-1.27	0.02
Arbeitspunkt 3	$T_{abs,o}$	[°C]	457.8	-	272.2	-	271.8	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	130.1	5.7	166.8	4.5	170.6	4.9
	$T_{air}$	[°C]	37.7	1.7	44.9	0.	44.4	3.4
	$A(\omega)$	[-]	0.083	0.011	0.219	0.015	0.234	0.005
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.41	0.00	-1.27	0.00	-1.25	0.01

Die Ergebnisse der sinusförmigen Messungen werden in der Tabelle 6 mit den Ergebnissen der nicht-sinusförmigen Messungen verglichen.

Bei dem Vergleich der Messgrößen zwischen sinusförmigen und nicht-sinusförmigen Messungen kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Die absolute Abweichungen der Amplitudengänge liegen zwischen 0.001 [-] und 0.007 [-], während das quadratische Mittel bei 0.004 [-] liegt. Für die Phasenverschiebung liegen die absolute Abweichungen zwischen 0.01 rad und 0.03 rad, der quadratische Mittelwert liegt bei 0.02 rad. Die Messungen mit einer nicht-sinusförmiger Anregung funktionieren also mindestens genauso gut wie die Messungen mit sinusförmiger Anregung.

**Tabelle 6: Vergleich der Ergebnisse zwischen der Messkampagne mit sinusförmiger Anregung (Tabelle 4) und der Messkampagne mit nicht-sinusförmiger Anregung (Tabelle 5). Für jede Zielgröße werden pro Receiverkategorie und Arbeitspunkt hier nur die Mittelwerte dargestellt. Die Spalte „Delta“ zeigt die Abweichung zwischen sinusförmiger und rampenförmiger Messungen. (\*)Für die Kategorie B wurde ein Receiver als Ausreißer identifiziert. Die Ergebnisse werden deswegen für Kat. B nur über zwei Receiver gemittelt. Für die Kategorie A und C wurden die Ergebnisse über 3 Receiver gemittelt dargestellt.**

Elektrische Heizleistung	Messgröße	Einheit	Kategorie A selektiv / evakuiert			Kategorie B (*) schwarz / nur teilweise evakuiert			Kategorie C schwarz / Luft		
			Sinus	Rampe	Delta	Sinus	Rampe	Delta	Sinus	Rampe	Delta
Arbeitspunkt 1	$T_{abs,o}$	[°C]	359.4	359.4	-	191.4	191.4	-	193.2	193.2	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	81.9	83.4	1.5	110.4	110.1	-0.3	114.7	115.0	0.3
	$T_{air}$	[°C]	26.7	29.0	2.3	29.9	33.0	3.1	28.9	32.5	3.6
	$A(\omega)$	[-]	0.055	0.059	0.004	0.168	0.169	0.001	0.187	0.181	-0.006
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.42	-1.43	-0.01	-1.34	-1.31	0.03	-1.32	-1.30	0.02
Arbeitspunkt 2	$T_{abs,o}$	[°C]	411.8	411.8	-	230.8	230.8	-	232.4	232.4	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	104.3	106.7	2.4	136.9	136.8	-0.1	141.6	142.0	0.4
	$T_{air}$	[°C]	29.9	32.9	3.0	35.7	38.0	2.3	34.2	37.8	3.6
	$A(\omega)$	[-]	0.074	0.076	0.002	0.194	0.189	-0.005	0.211	0.210	-0.001
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.40	-1.42	-0.02	-1.31	-1.29	0.02	-1.29	-1.27	0.02
Arbeitspunkt 3	$T_{abs,o}$	[°C]	457.8	457.8	-	272.2	272.2	-	271.8	271.8	-
	$T_{gl,o}$	[°C]	128.1	130.1	2.0	166.8	166.8	0.0	169.7	170.6	0.9
	$T_{air}$	[°C]	34.6	37.7	3.1	42.9	44.9	2.0	41.2	44.4	3.2
	$A(\omega)$	[-]	0.090	0.083	-0.007	0.221	0.219	-0.002	0.237	0.234	-0.003
	$\varphi(\omega)$	[rad]	-1.40	-1.41	-0.01	-1.29	-1.27	0.02	-1.25	-1.25	0.01

### II.1.3.3. Validierungsmesskampagne mit stationären Messungen

Aus den Messgrößen  $A(\omega)$  und  $\varphi(\omega)$  werden mit Auswerteverfahren des AP 1.3 (II.1.1.3) die thermischen Zielgrößen  $\varepsilon_{abs}$  (Emissionsgrad der selektive Beschichtung, [%]) und  $h_{ann}$  (Wärmeübergangskoeffizient im Ringspalt, [W/m<sup>2</sup>.K]) bestimmt und daraus die Wärmeverluste der Receiver berechnet. Alle nicht-sinusförmigen Messungen werden zuerst mit einer Kombination aus dem "Verzögerungsglied Verfahren" und der Möglichkeit 3a ausgewertet (siehe [Caron 2015a]). Danach wird die Auswertung mit der Möglichkeit 3b aktualisiert, welche ohne die explizite Bestimmung von  $A(\omega)$  und  $\varphi(\omega)$  auskommt (siehe [Caron 2015b]). Die Möglichkeit 3b liefert Ergebnisse besserer Qualität.

Die Ergebnisse der transienten Auswertung und ein Vergleich mit stationären Messungen am DLR-ThermoRec sowie Simulationen sind in Tabelle 7 und in Abbildung 21 dargestellt. Die Ergebnisse beruhen hier auf der Möglichkeit 3b (Seite 12-15). Die Simulationen beruhen hierbei auf verfügbaren Materialdaten (siehe AP2.1, II.1.2.1).



### **Fazit für Kategorie A**

Der Vergleich der spezifischen Wärmeverluste zwischen stationärer („steady-state“) und transienter Messung der Kategorie A zeigt eine sehr gute Übereinstimmung für alle Arbeitspunkte. Die relativen Abweichungen liegen zwischen -3.9% und +2.0%.

Spezifische Wärmeverluste, die auf Basis von Materialdaten simuliert sind, liegen unterhalb der stationären Messungen des ThermoRec, zeigen aber ein ähnliches nichtlineares Verhalten. Daher liegt es nahe, dass diese systematische Abweichung an den Input-Daten der Simulation liegt, insbesondere wird ein systematischer Bias des FTIR Spektrophotometer, welcher zur Messung der Reflektivität der selektiven Beschichtung verwendet wurde, als Ursache vermutet. Die über die FTIR-Messungen ermittelten Emissionsgrade liegen 1% bis 3% unterhalb der von den transienten Messverfahren identifizierten Werten.

Die Wärmeübergangskoeffizienten  $h_{ann}$ , die mit dem transienten Messverfahren identifiziert werden, liegen etwas höher, aber in derselben Größenordnung wie die simulierten Werte. Das transiente Messverfahren ermöglicht eine Trennung der Wärmeverlustmechanismen für Standard-Receiver mit niedrigen Wärmeverlusten.

### **Fazit für Kategorien B und C**

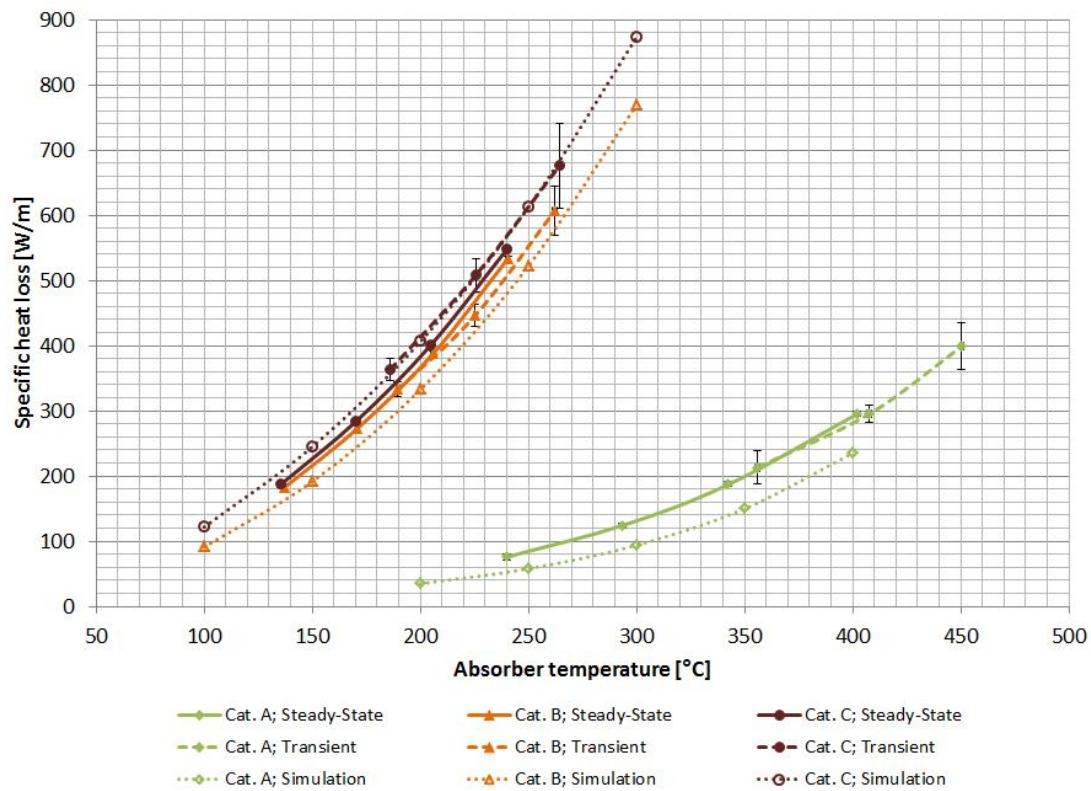
Der Vergleich von spezifischen Wärmeverlusten zwischen stationärer und transienter Messungen für die Kategorien B und C zeigt eine ähnliche gute Übereinstimmung. Die relativen Abweichungen liegen zwischen -5.2% und +0.5% für Kat. B und zwischen +1.7% und +8.8% für Kat. C. Die simulierten Wärmeverluste auf Basis von Materialdaten liegen unterhalb für Kat. B bzw. oberhalb für Kat. C Receiver.

Die Werte des Emissionsgrads, die mittels des transienten Messverfahren für Kat. B und Kat. C Receiver identifiziert werden, liegen leicht oberhalb der Referenzwerte, die mit dem DLR eigenen FTIR Spektrophotometer (siehe AP2.1, II.1.2.1) gemessen wurden. Die Abweichungen liegen zwischen 3.2 und 5.7 Prozentpunkte für Kat. B und zwischen 1.8 und 5.2 Prozentpunkte für Kat. C.

Die Wärmeübergangskoeffizienten  $h_{ann}$ , die mit dem transienten Messverfahren für Kat. B identifiziert werden, weichen einige Größenordnungen zu den simulierten Werten für einen Ringspaltdruck von  $10^{-4}$  mbar ab. Damit scheint bestätigt, dass die Kat. B Receiver während der Herstellung nicht vollständig evakuiert worden sind, bzw. dass das Vakuum über die Zeit nicht stabil gewesen ist. Dagegen liegen die für Kat. C (Luft Umgebungsdruck) identifizierten Wärmeübergangskoeffizienten in derselben Größenordnung wie die simulierten Werten für einen Ringspaltdruck von 1 bar (Luft). Das transiente Messverfahren ermöglicht eine Trennung der Wärmeverlustmechanismen, auch für schlechte Receiver.

**Tabelle 7: Ergebnisse der transienten Receivermessungen im Vergleich zu stationären ThermoRec-Messungen als Referenz und unabhängigen Simulationen [Caron 2015b]**

	Receiverkategorie	Kategorie A selektiv / evakuiert			Kategorie B schwarz / nur teilweise evakuiert			Kategorie C schwarz / Luft		
	Arbeitspunkt	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
TRANSIENT	$\bar{T}_{abs,o}$ [°C]	355.9	407.7	450.5	189.6	225.4	262.0	186.0	225.5	264.5
	$\epsilon_{abs}$ [%]	11.9%	12.0%	12.6%	90.5%	92.6%	92.2%	90.2%	88.7%	91.7%
	$h_{ann}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	0.064	0.013	0.032	1.57	0.498	0.207	4.56	4.40	4.58
	Optimierungskriterium $\delta^2$	0.19	0.47	0.55	0.22	0.21	0.18	0.20	0.29	0.30
	$\dot{Q}'_{th,loss}$ [W/m] TRANSIENT (A) Standard Bedingungen ( $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ , $v_{wind} = 0$ m/s)	213	295	399	333	446	606	364	508	676
SSSTEADY- STATE	$\dot{Q}'_{th,loss}$ [W/m] ThermoRec (B)	208	307	407	331	466	639	334	484	666
	Absolute Abweichung; (A-B) [W/m]	5	-12	-8	2	-20	-33	30	24	10
	Relative Abweichung; (A-B)/B [%]	+2.4%	-3.9%	-2.0%	+0.5%	-4.2%	-5.2%	+8.8%	+5.0%	+1.7%
SIMULATION UND MATERIALDATEN	$\epsilon_{abs}$ [%] (Material Daten) (FTIR Spektrophotometer)	8.8%	10.2%	11.5%	87.3%	86.9%	86.5%	87.4%	86.9%	86.5%
	$h_{ann}$ [W/m <sup>2</sup> .K] (Simulation)	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.013	4.49	4.58	4.63
	$\dot{Q}'_{th,loss}$ [W/m] SIMULATION (C) Standard Bedingungen ( $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ , $v_{air} = 0$ m/s)	158	252	365	300	422	576	357	505	683



**Abbildung 21: Ergebnisse der transienten Receivermessungen im Vergleich zu stationären ThermoRec-Messungen (steady-state) als Referenz. Zusätzlich: Simulationsergebnisse, welche auf verfügbaren Materialdaten beruhen [Caron 2015b].**

#### II.1.4. AP4 – Vermessung des solaren Absorptionsgrades

Das Ziel von AP 4 ist die Entwicklung eines Konzepts zur Messung des solaren Absorptionsgrades  $\alpha$  und Transmissionsgrades  $\tau$  des Glashüllrohres, wobei in einer ersten Phase eine Vorauswahl der Konzepte stattfindet und in der zweiten Projektphase ein erster Messaufbau entwickelt wird.

##### II.1.4.1. Entwicklung des Messkonzepts und Vorexperimente

###### Stand der Technik

Der solare Transmissionsgrad des Glashüllrohres  $\tau$  und der solare Absorptionsgrad der Absorberschicht  $\alpha$  bestimmen wesentlich den optischen Wirkungsgrad eines Parabolrinnen-Receiver und damit auch des gesamten Solarkraftwerkes. Daher ist die Kenntnis dieser Größen, jedoch insbesondere ihres Produkts  $\alpha \cdot \tau$ , wichtig. Die absorbierte Energie ist in guter Näherung proportional zum Produkt  $\alpha \cdot \tau$ . Absorptionsgrad  $\alpha$  und Transmissionsgrad  $\tau$  liegen beide bei modernen Receivern bei 96%, wodurch sich für das Produkt  $\alpha \cdot \tau \sim 92\%$  ergibt.

Zu Beginn dieses Projekts war Stand der Technik, dass der optische Wirkungsgrad lediglich an einzelnen, ausgebauten Receivern mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden kann. Dies wird in Laborprüfständen an Forschungsinstituten wie dem DLR in Deutschland (OptiRec Teststand des DLR-QUARZ-Zentrums), CENER in Spanien [Mateu 2011] und in einem Außenprüfstand des NREL in den USA [Kutscher 2014] durchgeführt. So können Receiverhersteller bei der Entwicklung und Qualifizierung der Receiver unterstützt werden und Kraftwerksprojektiertoren Daten als Basis für die Lieferantenauswahl erhalten. Ab dem Zeitpunkt des Receiver-Einbaus, d.h. während der Betriebsphase des Kraftwerks, kann der optische Wirkungsgrad nicht mehr gemessen werden. Um Informationen über die Receiverqualität zu erhalten, muss der Receiver ausgebaut und zu einem Labor eingeschickt werden, was sich nur bei sehr konkreten Verdachtsfällen lohnt.

Eine Messung des optischen Wirkungsgrades der Receiver im Feld ist allerdings wichtig, um Informationen über Verschmutzung und Dauerhaftigkeit der Qualität der Receiver zu erhalten. So können die Receiver optimiert, Garantieansprüche wahrgenommen, oder der Austausch der Receiver veranlasst und so die Wirtschaftlichkeit des Solarkraftwerkes verbessert werden. Daher wird für dieses Arbeitspaket das Ziel gestellt ein Konzept zur Messung des solaren Transmissionsgrads des Glashüllrohres  $\tau$  und des solaren Absorptionsgrads der Absorberschicht  $\alpha$  im Feld zu entwickeln. Aus der Anwendung ergibt sich eine gewünschte Unsicherheit von kleiner 1%.

### **Ansätze zur Messung des Produkts aus Absorptions- und Transmissionsgrad $\alpha \cdot \tau$**

Zur Messung von  $\alpha \cdot \tau$  gibt es kalorimetrische oder radiometrische Verfahren. In beiden Fällen wird der Receiver mit Licht bestrahlt.

Im kalorimetrischen Verfahren wird die im Absorber absorbierte Lichtenergie über die Temperaturerhöhung des Receivers oder des Fluids gemessen. Je nach Messprinzip muss mit relativ hohen Leistungen von 0,3 kW/Receiver bis 20 kW/Receiver gearbeitet werden, damit die Temperaturerhöhung noch gemessen werden kann. Die langen Zeitkonstanten und hohen Leistungen lassen es hier normalerweise nicht zu, spektral aufgelöst zu messen, weshalb kalorimetrische Messungen mit Sonnensimulator-Lampen oder mit Sonnenlicht durchgeführt werden.

Der zweite Ansatz ist, die reflektierte Lichtenergie zu messen und so über die Energieerhaltung bei vernachlässigter Transmission durch den Absorber die absorbierte Energie zu bestimmen:

$$E_{\text{eingestrahlt}} = E_{\text{absorbiert}} - E_{\text{reflektiert}}$$

Da hier Strahlung detektiert werden soll, können schnelle und empfindliche Detektoren verwendet werden, wodurch spektral aufgelöste Messungen möglich werden und nicht-sonnenähnliche Lichtquellen verwendbar sind. Energie, die nicht detektiert wird, wird hier also als absorbierte Energie gezählt. Daher muss bei dieser Methode sichergestellt sein, dass alle Energieflüsse korrekt berücksichtigt sind. Auf die Messung eines gesamten Receivers mit Glas- und Absorberrohr angewandt muss insbesondere darauf geachtet werden, dass auch diffus reflektierte Strahlung und Absorption im Glas korrekt einbezogen sind.

### **Direkte Reflexion, Kleinwinkelstreuung, diffuse Reflexion**

Laut dem Brechungsgesetz gilt für einen perfekten Spiegel, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Im Allgemeinen wird jedoch Licht auch in andere Raumrichtungen als die der perfekten Reflexion reflektiert und daher der reflektierte Lichtstrahl mehr oder weniger stark aufgestreut.

Der Streuwinkel  $\vartheta$  ist der Winkel des reflektierten Lichtstrahls zum Winkel bei direkter, spiegelnder Reflexion. Die Aufstreuung kann verschiedene physikalische Ursachen haben. Dies sind beim Receiver Unebenheiten der Oberflächen und Streuung an Verunreinigungen. Im Weiteren werden folgende Begriffe verwendet, die die Größe des Ablenkungswinkels beschreiben:

- *direkte Reflexion*:  $\theta \ll 1^\circ$ , nur unwesentliche Ablenkung vom idealen Ausfallswinkel, Strukturen der Lichtquelle bleiben im reflektierten Bild erhalten
- *Kleinwinkelstreuung*:  $1^\circ < \theta < 10^\circ$
- *diffuse Streuung*:  $\theta > 10^\circ$

Die Problematik der diffusen Reflexion besteht darin, dass hier nur niedrige Strahldichten gemessen werden, diese aber große Raumwinkel betreffen. Dadurch ist schwer abschätzbar, ob diffuse Reflexion beim jeweiligen Messobjekt vernachlässigbar ist.

Das typische Reflexionsverhalten von Parabolrinnenreceivern kann anhand in Abbildung 22 nachvollzogen werden. Es handelt sich um eine Fotografie unterschiedlicher Receiver, die über eine längliche Leuchtstoffröhren-Lampe beleuchtet werden. Die Lampe befindet sich ca. 2 m oberhalb der Receiver und ist senkrecht zur Receiverachse orientiert. Die Fotografie wurde aus einem Abstand von ca. 4 m aufgenommen. Eine geometrische Auswertung ist über den Absorber Durchmesser von 70 mm möglich. Damit ergeben sich ein Streuwinkel von ca.  $18^\circ$  für den linken Bildrand, bzw. ca.  $9^\circ$  für den rechten Bildrand.

Die Reflexion im Glashüllrohr bildet in allen Receivern relativ gut die Struktur der Lichtquelle ab, d.h. es liegt am Glas hauptsächlich direkte Reflexion vor. Bei genauerer Betrachtung und kürzeren Belichtungszeiten wird auch erkennbar, dass es sich bei der Reflexion um zwei etwa gleich starke Reflexe handelt. Ein Reflex tritt an der äußeren Grenzfläche von Glas zu Luft, und ein Reflex von der inneren Grenzfläche Glas zu Vakuum auf.

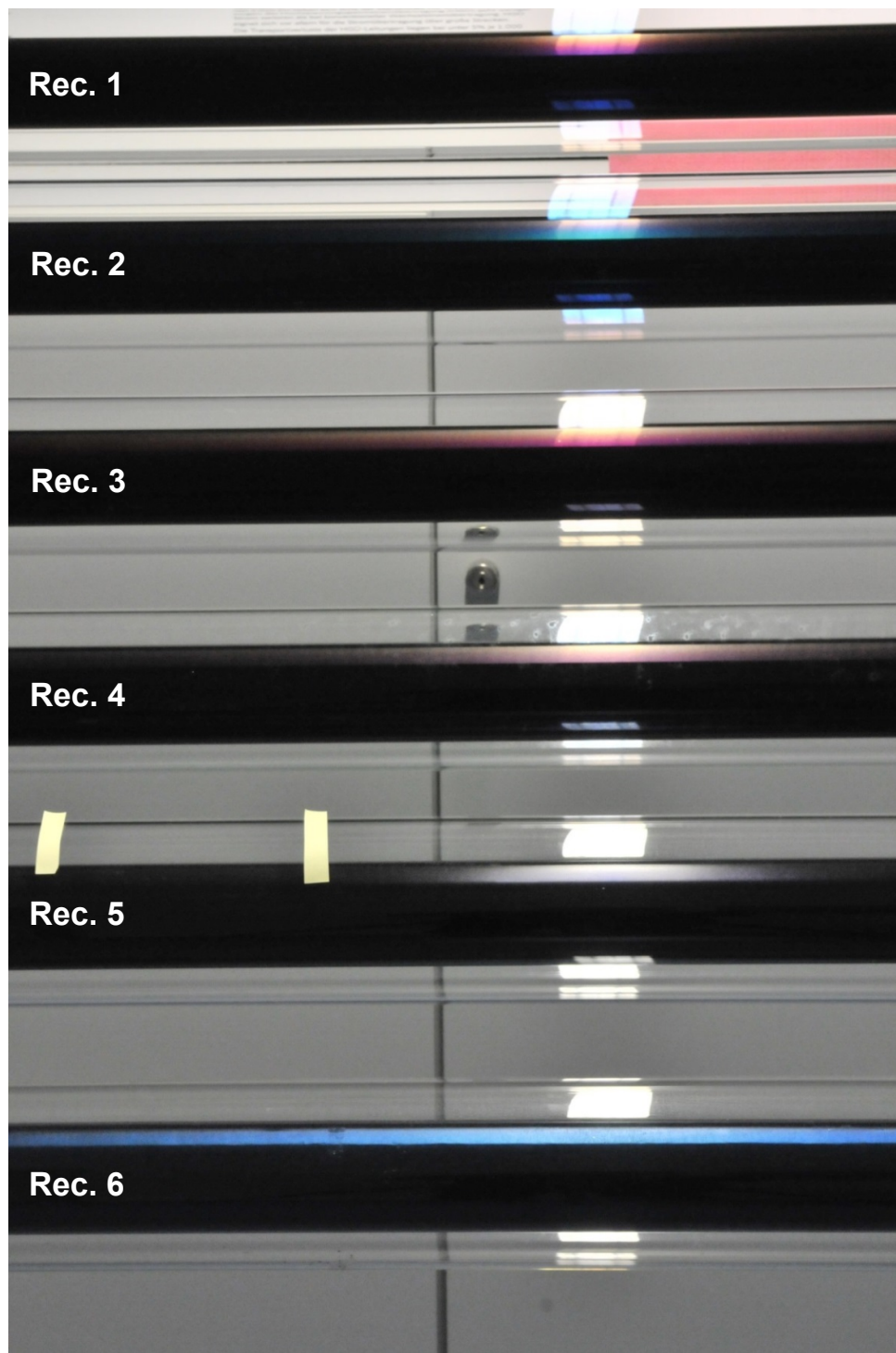
Streuung in größere Winkel am Glas ist nur bei dem vierten Receiver von oben (Rec. 4) zu sehen. Dieser Receiver war längere Zeit in einem Loop eingebaut, wobei die Anti-Reflexschicht deutliche Alterungsspuren zeigt. Aber auch hier ist bereits erkennbar, dass diese Streuung in kleine Winkel bevorzugt auftritt. Für die Reflexion am Absorber ergibt sich ein nicht so klares Bild. Während beim obersten Receiver die Reflexion am Absorber so gerichtet ist, dass sogar noch die Strukturen der Lichtquelle erkennbar ist, geht beim untersten Receiver die Streuung der Reflexion am Absorber deutlich über  $18^\circ$  hinaus.

### **Anforderungen**

Während der Konzeptfindungsphase werden Ideen entwickelt und gesammelt und mit Anforderungen und gewünschten Eigenschaften verglichen. Über eine Bewertungsmatrix werden dann die aussichtsreichen Konzepte identifiziert. Um die vorhandenen und entwickelten Messkonzepte sinnvoll vergleichen zu können, werden folgende Anforderungen festgelegt:

- Zerstörungsfreie Messung
- Hohe Messgenauigkeit des  $\alpha \cdot \tau$ -Wertes
  - Messunsicherheit des optisches Wirkungsgrades möglichst kleiner als 1%
- Diffuse Reflexion soll sinnvoll berücksichtigt sein
- Informationstiefe ist wünschenswert, aber nicht notwendig, z.B.:
  - Trennung von  $\alpha$  und  $\tau$
  - ortaufgelöstes spektrales Verhalten von  $\alpha$  und  $\tau$
  - Messung des Absorptionsgrades des Glases
  - Bidirektionale Reflektivitätsfunktion (BRDF)
- Handling: Einfache Einsetzbarkeit und Bedienung im Feld
- niedrige Empfindlichkeit auf Temperatur, Luftfeuchte, Staub oder Umgebungslicht
- Niedrige Entwicklungskosten, Gerätekosten, Betriebskosten





**Abbildung 22: : Fotografie unterschiedlicher Receiver des DLR QUARZ-Labors in Köln; Über dem Receiver befindet sich eine längliche Lampe mit Leuchtstoffröhre**

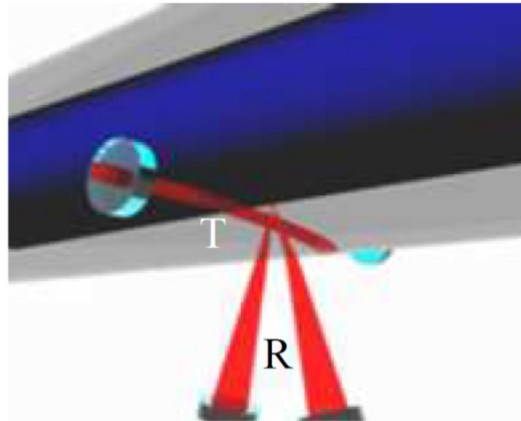
## **Beschreibung der Messkonzepte**

Im Folgenden werden die entwickelten Konzepte kurz vorgestellt. Allen Konzepten ist gemein, dass der Reflexionsgrad gemessen wird und der Absorptionsgrad daraus berechnet wird.

### ***Veröffentlichte Messkonzepte***

#### **CENER Konzept**

Beim spanischen Qualifizierungslabor CENER wurde ein Laborprüfstand zur Messung von  $\alpha$  und  $\tau$  aufgebaut [Mateu 2011]. Der Strahlengang ist in Abbildung 23 dargestellt. Bei diesem Verfahren werden  $\tau$  und  $\alpha$  unabhängig voneinander gemessen. Die Verwendung von Linsen mit begrenzten Dimensionen hat die Auswirkung, dass in der Transmissionsmessung diffuse Reflexion und Streuung als verloren angenommen wird. In Reflexion wird diffuse Reflexion am Absorber vernachlässigt. Die Ankopplung der Linsen an eine Weißlichtquelle und an ein Spektrometer ist über Glasfasern realisiert. Für den Vergleich mit anderen Messkonzepten wird im Folgenden angenommen, dass diese Messgeometrie auf ein Feldmessgerät übertragen würde.

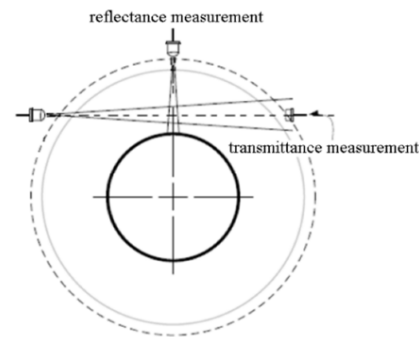
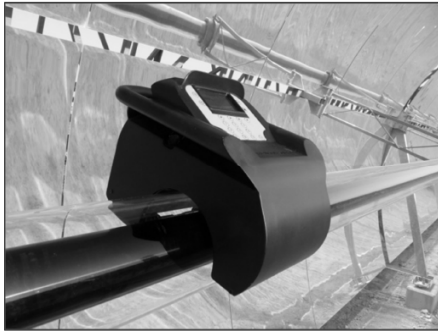


**Abbildung 23: CENER Konzept [2], T: Messung der Glastransmissionsgrad, R: Messung der Absorber Reflexionsgrad**

#### **Mini Incus Konzept (Abengoa)**

Im Rahmen der Projektzeitlauf wurde das Messgerät Mini Incus von der Firma Abengoa vorgestellt [Espinosa-Rueda 2014]. Dieses einfache und einfach zu bedienende Messgerät wird für die Routinemessung von  $\alpha$  und  $\tau$  in den Kraftwerken von Abengoa eingesetzt und ermöglicht insbesondere auch die Messung des Verschmutzungsgrades der Receiver. Statt einer komplizierten Optik und Spektrometern werden hier 14 Leuchtdioden und Photodioden eingesetzt. Die Dioden ermöglichen die Messung an 14 verschiedenen Wellenlängen im Bereich von 365 nm bis 1950 nm. Der Strahlengang und das Gerät sind in Abbildung 24 zu sehen. Aufgrund der Verwendung von LEDs ist nicht klar definiert, inwieweit Kleinwinkelstreuung und diffus reflektiertes Licht die Messung verzerren. Teilweise wird sie nicht richtig berücksichtigt.





**Abbildung 24: Abengoa Solar Mini Incus Gerät und Strahlengang [Espinosa-Rueda 2014]**

### Weitere untersuchte Messkonzepte

#### Konzept 1: Integrationskugel mit mittigem Receiver

- *Aufbau und Funktionsprinzip*

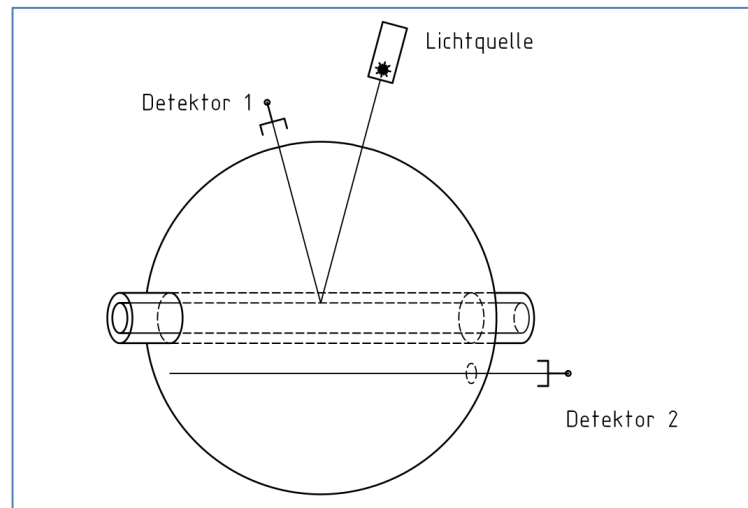
Das Konzept mit Integrationskugel und mittigem Receiver ist in Abbildung 25 abgebildet. In der optischen Spektroskopie sind Integrationskugeln verbreitete Geräte mit bekannten Eigenschaften. Integrationskugeln werden typischerweise für das Sammeln in unbekannter Richtung reflektierten Lichts eingesetzt, und sind daher für die Anwendung eine naheliegende Wahl.

Eine Lichtquelle, z.B. eine Weißlichtquelle mit Monochromator erzeugt einen gebündelten einfarbigen Strahl, der auf den Receiver gerichtet wird. Spiegelnd reflektiertes, oder vom Glashülrohr reflektiertes Licht kann durch einen eigenen Detektor 1 gemessen werden. Evtl. kann darauf aber verzichtet werden und nur Detektor 2 wird verwendet. Dieser sammelt das gesamte reflektierte Licht über die hoch-reflektierend beschichtete Kugelfläche. Aus dem Gesamreflexionsgrad wird auf den Gesamtabsorptionsgrad zurückgeschlossen.

- *Vor- und Nachteile*

Der Receiver wird in diesem Konzept aus Symmetriegründen mittig angeordnet. Vorteil ist, dass die Kugel den Receiver fast vollständig umschließt und so gleichermaßen diffus und spiegelnd reflektiertes Licht sammelt. Zudem haben ideale Integrationskugeln gute räumlich-integrative Eigenschaften, wodurch eine genaue Zuordnung von Reflexen unnötig sein sollte.

Nachteilig ist, dass aufgrund der großen absorbierenden Flächen des Receivers die Kugel, bei einem angenommenen Verlustanteil von 5%, mit ca. 1400 mm Durchmesser sehr groß sein muss und damit sehr unhandlich und teuer wird. Zudem wird sich das System nur näherungsweise wie in der Theorie beschrieben verhalten, da der Receiver die Kugel mittig durchstößt. Hierdurch könnte es zu dem oft beobachteten Effekt kommen, dass die Integrationskugel einen unterschiedlichen Wirkungsgrad für unterschiedliche Reflexionswinkel aufweist. Hinzu kommt noch, dass eine orts aufgelöste Messung nur begrenzt machbar ist und dass die Absorption im Glas modelliert werden muss. Der Hauptnachteil wird jedoch in der Schmutzempfindlichkeit von Integrationskugeln gesehen.



**Abbildung 25: Konzept Integrationskugel mit Receiver mittig**

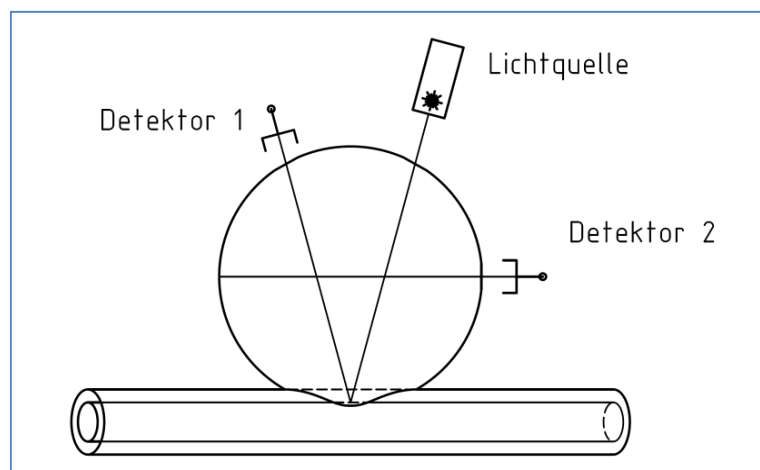
Konzept 2: Integrationskugel mit streifendem Receiver

- *Aufbau und Funktionsprinzip*

Aufgrund des großen Durchmessers bei mittiger Receiveranordnung in der Integrationskugel kann der Receiver auch tangential an die Integrationskugel angelegt werden (Abbildung 26).

- *Vor- und Nachteile*

Vor- und Nachteile dieses Konzepts sind dem Konzept der Integrationskugel mit mittigem Receiver sehr ähnlich. Dem Vorteil der deutlich kleineren Integrationskugel steht gegenüber die kompliziertere Bauform und insbesondere die Problematik der Abdichtung gegenüber Lichtverlust am Receiver-Kugel-Übergang.



**Abbildung 26: Konzept Integrationskugel mit Receiver tangential**

### Konzept 3: Integrationszylinder

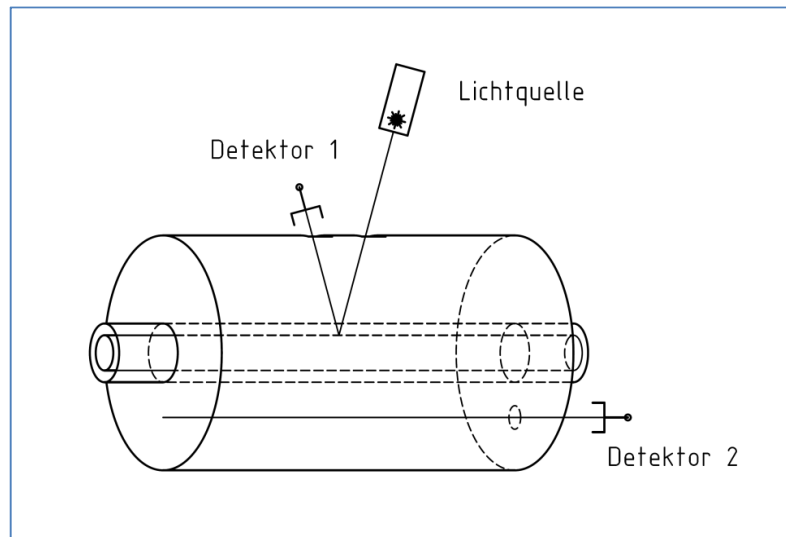
- *Aufbau und Funktionsprinzip*

Das Konzept eines Integrationszylinders ist in Abbildung 27 dargestellt. Über Detektor 1 kann der direkte Reflex analysiert werden, und evtl. der vom Glashüllrohr kommenden Reflex gemessen werden. Im Wesentlichen würde die Messung aber über Detektor 2 erfolgen, der das gesamte reflektierte Licht als integrale Größe misst.

- *Vor- und Nachteile*

Ein Integrationszylinder hat gegenüber den Integrationskugeln den Vorteil eines geringeren Herstellungsaufwandes. Ein Messaufbau basierend auf diesem Konzept wird derzeit vom Fraunhofer ISE im Rahmen des BMWi-Projekts StaMeP entwickelt [Georg 2015].

Nachteilig an diesem Konzept sind die unbekannten und vermutlich nicht räumlich homogenen Lichtsammelleigenschaften eines integrierenden Zylinders. Zusätzlich gelten fast alle Nachteile der Integrationskugeln der Schmutzempfindlichkeit und unhandlichen Abmaßen.



**Abbildung 27: Konzept: Integrationszylinder**

#### Konzept 4: Abbildungszyylinder

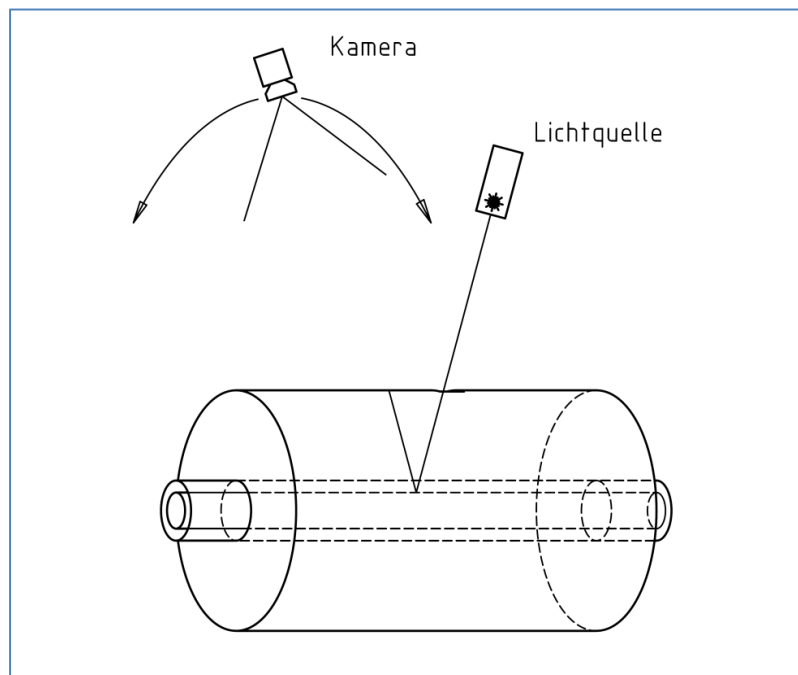
- *Aufbau und Funktionsprinzip*

Die vermutete Schwäche der ungenügenden räumlich integrativen Fähigkeiten eines Zylinders könnte umgangen werden, wenn der Zylinder statt zum Integrieren des Lichts, als Projektionsfläche genutzt würde.

Verschiedene Varianten sind denkbar. In der Abbildung 28 wird die Kamera außen um den Zylinder herum geführt werden. Dabei ist die Zylinderoberfläche transparent-streuend ausgeführt. Eine Kamera wird um den Zylinder herum geführt. Über entzerrte Fotos wird so die räumliche Strahlungsverteilung des reflektierten Lichts gemessen. Um die spektrale Information zu erhalten wird dann entweder bei jeder Kameraposition eine einfarbige Lichtquelle auf alle Wellenlängen durchgestimmt, oder eine Weißlichtquelle wird mit einer Hyperspektralkamera kombiniert, die viele Farbkanäle in relevanten Spektralbereich gleichzeitig messen kann. Denkbar ist auch eine Abbildung der Zylinderinnenfläche durch Positionierung der Kamera im Zylinder oder durch eine Ausspiegelung des Bildes nach außen.

- *Vor- und Nachteile*

Vorteil der Methode ist, dass eine räumliche Verteilung der Reflexionseigenschaften gewonnen wird. So können evtl. sogar Reflexe von Glas und Absorber getrennt werden. Als Risiko dieser Methode wird die schwierige Kalibration angesehen.



**Abbildung 28: Konzept Abbildungszyylinder**

Konzept 5: Goniometer

- *Aufbau und Messprinzip*

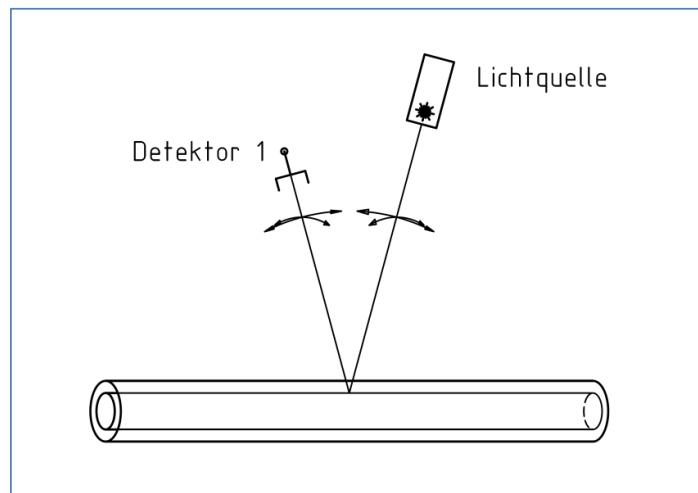
Die räumliche Verteilung der reflektierten Strahlung eines Objekts wird klassischerweise über eine goniometrischen Aufbau gemessen, siehe Abbildung 29, der auch hier eingesetzt werden könnte. Hier werden die Lichtquelle und der Detektor um den Receiver bewegt und so das Strahlungsfeld charakterisiert, also die BRDF gemessen.

- *Vor- und Nachteile*

Vorteil des Konzepts ist die hohe Informationstiefe, die potentiell erreicht werden kann, da die BRDF von Absorber und Glashüllrohr gemessen werden kann

Nachteil der Methode ist der sehr hohe Zeitaufwand, da für einen Messpunkt auf dem Receiver der Detektor und Lichtquelle um je zwei verschiedene Winkel bewegt werden und die Wellenlänge verändert werden müssen. Noch aufwändiger wird die Messung, wenn der Receiver an mehreren Stellen charakterisiert werden soll. Zwar ließen sich verschiedene Vereinfachungen über Reflexionsmodelle einführen, aufgrund des zeitlichen Aufwands ist aber das Goniometer nur der Vollständigkeit halber hier angeführt.

Im Wesentlichen stellen die Konzepte von CENER und Abengoa vereinfachte Versionen dieser Messung dar. Dabei beschränken sich diese auf nur einen Einfallswinkel und ergänzen die Messung durch eine Transmissionsmessung. Durch die Art der verwendeten optischen Systeme vernachlässigen diese jedoch diffus an der Absorberschicht reflektiertes Licht und einen Teil der unter kleinen Winkeln gestreuten Lichts. Zusätzlich muss für die Winkelabhängigkeit der gemessenen Größen mit Annahmen gearbeitet werden.



**Abbildung 29: Konzept Goniometer**

### Konzept 6: Kamera-basierte BRDF-Messung

- *Aufbau und Funktionsprinzip*

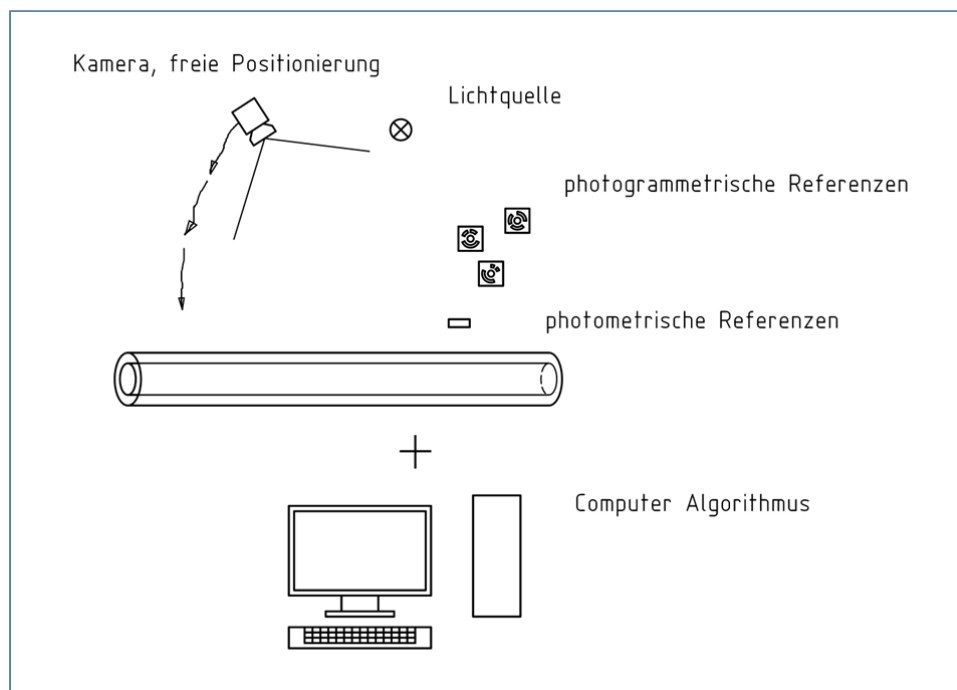
Inspiziert durch das beim DLR eingesetzte photogrammetrische Verfahren und Raytracing-Computerprogrammen wurde ein weiteres Konzept erarbeitet. Die wesentlichen Komponenten sind in Abbildung 30 dargestellt.

Eine weiße Lichtquelle sorgt für eine gleichmäßige Beleuchtung des Receivers. Um Störlicht zu vermeiden, muss die Messung in der Nacht durchgeführt werden. Eine Kalibration der Beleuchtungsstärke ermöglichen photometrische Referenzen. Mit einer Hyperspektralkamera wird der Receiver aus unterschiedlichen Richtungen fotografiert. Um die räumliche Position der Kamera bestimmen zu können werden photogrammetrische Referenzen im Bild verwendet. Die BRDF-Parameter in Modellen werden über Optimierungsalgorithmen bestimmt, der eine 3-D-Raytracing-Simulation der Szene und die Fotos der Kamera in Übereinstimmung zu bringt. Alternativ ist auch eine Lumitexel-basierte Bestimmung der BRDF denkbar.

- *Vor- und Nachteile*

Vorteil des Konzepts ist die potentiell sehr hohe Informationstiefe, da die BRDF von Absorber und Glashüllrohr, evtl. sogar orts aufgelöst, gemessen werden kann. Ein Risiko stellt die Neuartigkeit der Methode dar und die Übertragbarkeit vom Labor ins Feld.

Nachteil ist der hohe Entwicklungsaufwand der Methode. Zudem sind derzeit Hyperspektralkameras nur als Zeilenkameras, oder als Kameras mit stark reduzierter Auflösung erhältlich. Zudem bilden sie meist nur eine Oktave im Spektrum ab, also z.B. 400... 800 nm, oder 800...1600 nm, wodurch ca. drei Hyperspektralkameras eingesetzt werden müssten. Diese Nachteile haben sich im Rahmen der Projektlaufzeit mit der technologischen Entwicklung von Hyperspektralkameras bereits entschärft.



**Abbildung 30: Konzept Kamera-basierte BRDF-Messung**

Konzept 7: Nutzung von Aufheizkurven

Das Konzept wäre eine Weiterentwicklung eines Verfahrens bei NREL, welches ausgebaute Receiver unter Solarstrahlung mit senkrechter Einstrahlung in einem Spezial-Rig untersuchen kann.

In diesem Konzept würde ein in eine Parabolrinnen-Anlage eingebauter und mit HTF gefüllter Receiver über eine Aufheizkurve charakterisiert werden. Hierfür wäre zum Zeitpunkt  $t_0$  der Receiver auf Umgebungstemperatur und abgedeckt, die HTF-Pumpe wäre gestoppt. Zum Zeitpunkt  $t > t_0$  würde die Abdeckung Richtung Sonne entfernt werden, und das Rohr würde sich aufheizen. Da die Temperaturen nur minimal über der Umgebungstemperatur wären, wären die thermischen Verluste sehr gering und könnten weitgehend vernachlässigt werden. Aus der Steigung der Temperaturkurve des Absorberrohr-Materials, den thermischen Kapazitäten von Stahl und HTF, der gemessenen DNI sowie der Winkelausrichtung zur Sonne (Einfallswinkel  $\theta$ ) könnte das Produkt aus Transmissionsgrad und Absorptionsgrad der selektiven Beschichtung gemessen werden.

Die Zone der Messung müsste weit genug von den Rändern der Bestrahlung bzw. Receiver-Enden entfernt sein, damit die Randeffekte vernachlässigt werden können. Zudem müsste nach Einkopplung der Energie gewartet werden, bis eine homogene Temperatur erreicht worden wäre oder es müsste das Temperaturprofil gemessen bzw. bekannt sein.

Folgende Dinge müssten hinsichtlich der Messgenauigkeit näher untersucht werden:

- Wärme-Dissipation über die Receiver-Enden über Wärmeleitung und HTF-Konvektion muss an der Messzone vernachlässigbar sein.
- Akzeptanzwinkel für die einfallende Strahlung nach Abdeckung muss bekannt sein, bzw. die DNI muss in diesem Strahlungsbereich gemessen werden.
- Wärmekapazität müsste bekannt sein bzw. kalibriert werden.
- Das Temperaturprofil radial (HTF-Stahl) und in Umfangsrichtung (bestrahlte-unbestrahlte Seite) muss bekannt sein, oder gemessen werden.



### **Vergleich und Bewertung der Messkonzepte**

Zur Priorisierung der Messkonzepte wird nun im nächsten Schritt eine Bewertungsmatrix erstellt, um für die nächste Projektphase ein oder zwei Favoriten zu ermitteln für die ein erster Messaufbau erstellt werden soll.

Im Folgenden wurden die Konzepte nach verschiedenen Kriterien bewertet und verglichen. Die Bewertung der Konzepte in Bezug auf gewisse Anforderungen wurde auf Basis der Erfahrung mit optischer und thermischer Messtechnik gemeinsam von drei wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführt. Die Bewertung ist nach Kategorien und Unterkategorien gegliedert und zusammen mit den Gewichten in Tabelle 8 aufgeführt.

Das Ergebnis lässt sich zu fünf Gruppen zusammenfassen. Am besten bewertet wurde das Goniometerkonzept mit 75%. Hier hat sicherlich die erwartete hohe Messgenauigkeit eine wesentliche Rolle gespielt. Zusätzlich wird erwartet, dass die Messung im Feld nicht übermäßig umständlich ist.

Auf dem 2. Platz kommen drei Konzepte, die mit ca. 63%, 64% und 65% sehr ähnlich bewertet wurden. Dies sind das Konzept BRDF-Messung mit Hyperspektralkamera und die zwei veröffentlichten Konzepte von CENER und Abengoa. Gerade das Konzept von Abengoa kann durch die sehr einfache Bedingung die niedrige Bewertung in der Messgenauigkeit (diffus reflektierte Strahlung wird vernachlässigt) kompensieren und ist ein interessanter Praxis-Kandidat für weniger wissenschaftliche Anwendungen.

Die Konzepte mit Integralkugel kommen auf Platz 3 mit 54% und 56%. Darauf folgen die Zylinderkonzepte. Die Integralkugelkonzepte erhielten schlechte Bewertungen im Handling und in den Kosten. Bei den Zylinderkonzepten ist fraglich, ob sie die hohe Messgenauigkeit erreichen, zusätzlich ist das Handling ungünstig. Das einzige kalorimetrische Konzept ist umständlich in der Durchführung und wahrscheinlich nicht sonderlich genau und liefert keine Detailinformation. So erklärt sich der letzte Platz für dieses Konzept.

Tabelle 8: Vergleichsmatrix der Konzepte (5=sehr gut; 1=sehr schlecht)

	Integrationkugel, Receiver axial 1	Integrationskugel, Receiver tangential 2	Integrationszylinder 3	Abbildungszylinder 4	Goniometer BRDF-Messung 5	BRDF-Messung mit Hyperspektralkamera 6	Aufheizkurve 7	CENER Labor Teststand 8	Abengoa Solar Mini Incus 9	Gewichtung Unterategorie Gewichtung Kategorie 10
<b>Genauigkeit <math>\tau^*\alpha</math></b>	80%	80%	60%	40%	80%	80%	40%	40%	20%	8
	4	4	3	2	4	4	2	2	1	1
<b>Detailtiefe des Ergebnisses</b>	37%	37%	37%	67%	80%	93%	0%	93%	90%	4
Trennung von Glas und	1	1	1	3	4	5	0	5	5	4
Räumliche Auflösung:	2	2	2	3	3	5	0	3	3	1
Spektrale Auflösung	5	5	5	5	5	3	0	5	4	1
<b>Praxistauglichkeit</b>	27%	33%	39%	47%	67%	41%	70%	71%	95%	5
Schmutzempfindlichkeit/	1	1	1	3	4	3	5	4	5	8
Temperaturempfindlichkeit Gerät										
Messung von einem heißen Receiver	0	0	0	3	4	5	5	5	5	2
Messaufwand	0	1	2	2	3	1	2	3	5	9
Bedienerqualifikation	3	3	3	3	3	2	3	3	5	4
Auswerteaufwand	3	3	3	1	3	1	3	4	5	5
Absolute oder relative Messung/ Kalibration	3	3	3	3	3	3	5	3	1	2
<b>Kosten</b>	20%	34%	60%	60%	60%	29%	80%	74%	100%	1
Preis	1	2	3	3	3	0	4	4	5	5
Normteile vs. Extraanfertigung	1	1	3	3	3	5	4	3	5	2
<b>Entwicklung</b>	70%	70%	40%	40%	70%	10%	40%	80%	100%	2
geringes Entwicklungsrisiko	4	4	2	3	4	1	2	4	5	1
geringer Entwicklungsaufwand	3	3	2	1	3	0	2	4	5	1
<b>Gesamtbewertung</b>	54%	56%	48%	48%	75%	63%	42%	64%	65%	
Platz	3	3	4	4	1	2	5	2	2	

#### **II.1.4.2. Detailsauslegung und Aufbau des Prototyps**

Aufgrund der positiven Beurteilung des Goniometer Konzepts wird dieses Verfahren näher untersucht. Die Auslegung dieses Konzept und der Aufbau eines Prototyps sind in den folgenden Absätzen weiter beschrieben.

##### **Detailsauslegung des Prototyps**

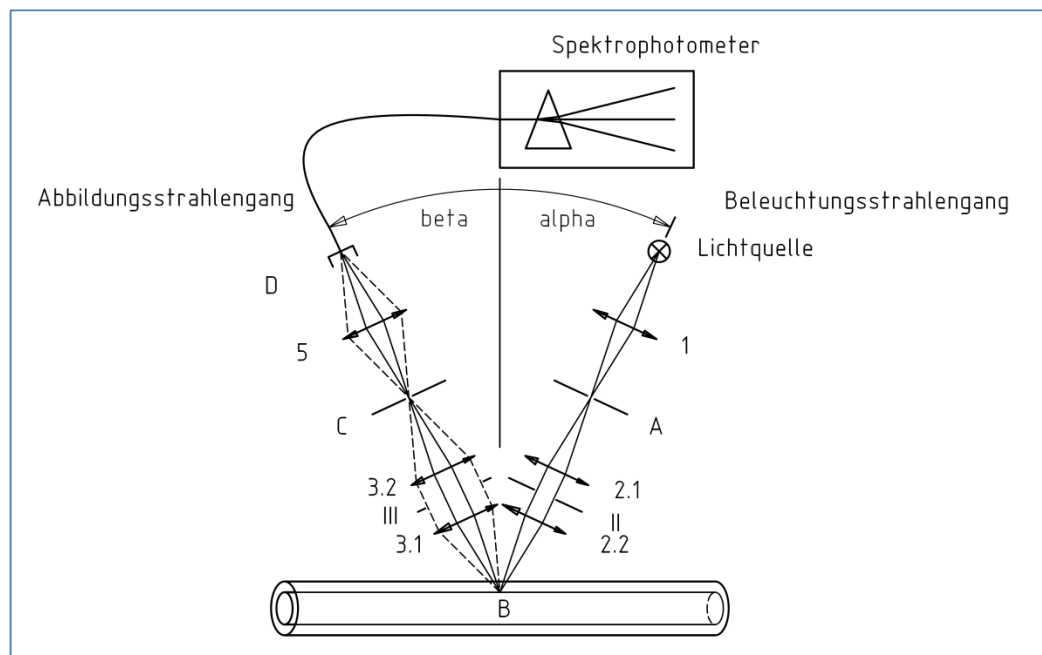
Durch die Art der verwendeten optischen Systeme, die für die CENER und Abengoa Konzepte zum Einsatz kommen, wurden an der Absorberschicht diffus reflektiertes Licht und einen Teil der unter kleinen Winkeln gestreuten Lichts in diesem Prototyp vernachlässigt. Zusätzlich muss für die Winkelabhängigkeit der gemessenen Größen mit Annahmen gearbeitet werden. Um diese Eigenschaften trotzdem messen zu können wurde ein detaillierterer Strahlengang für das Konzept basierend auf dem Strahlengang eines Mikroskops entwickelt. Dieser Strahlengang ist für Winkel  $< 90^\circ$  in Abbildung 31 und für Winkel  $= 90^\circ$  in Abbildung 32 dargestellt.

Dabei wird die Lichtquelle zunächst auf die Leuchtfeldblende A, dann auf die Probe B, dann auf die Zwischenfeldblende C und schließlich auf den Faserkoppler D abgebildet. Durch die Leuchtfeldblende A kann die Größe des auf dem Absorber belichteten Flecks gewählt werden. Bei richtiger Auslegung der Linsen 1, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2 und 5 ermöglicht die Zwischenfeldblende C – analog zum Prinzip des konfokalen Mikroskops – die Auswahl der Messebene in B, sodass die Reflexe von Glashüllrohr und Absorber klar getrennt werden können.

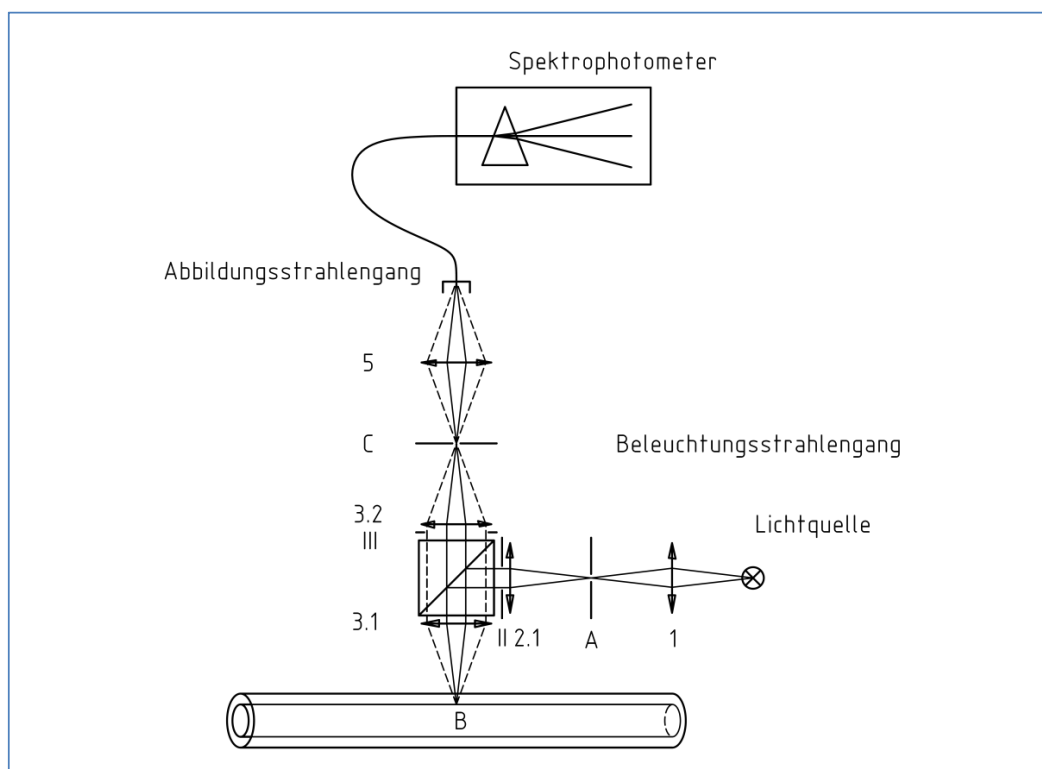
Über die Aperturblenden II und III können die Winkelaufspaltung von Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang festgelegt werden. Sinnvoll sind hier auch Dunkelfeldblenden verwendbar, um das diffuse Licht getrennt vom direkten Licht messen zu können. So kann abgeschätzt werden, ob eine nähere Charakterisierung des diffus reflektierten Lichts notwendig ist. Diese wird dann durch eine Winkelverstellung des Abbildungsstrahlengangs  $\beta$  (Abbildung 31) durchgeführt. Konstruktionsbedingt bleibt der Winkelbereich nahe  $90^\circ$  nicht messbar. Evtl. ist daher ein ergänzender Messkopf für  $90^\circ$ -Messungen sinnvoll, der in Abbildung 32 dargestellt ist.

Bei dieser Messgeometrie ist insbesondere auch die Verwendung von objektivseitigen Linsen 3.1 mit deutlich größerem Akzeptanzwinkel möglich. Nicht eingezeichnet in Abbildung 31 und Abbildung 32 sind Teile des Strahlengangs, die Bilder der Blenden zu Okularen oder Kameras ausspiegeln und eine genaue Justage der Blenden ermöglichen.

Dieser Strahlengang bietet eine sehr umfangreiche geometrische Kontrolle des eingestrahnten und gemessenen Lichts. Dies ermöglicht das Zusammensetzen von Messungen an unterschiedlichen Winkeln, wie sie für die Einbeziehung von diffus reflektiertem Licht bei einem Goniometer notwendig ist. Gleichzeitig ist der Strahlengang wesentlich komplexer als die umgesetzten Konzepte von CENER oder Abengoa.



**Abbildung 31: Goniometerkonzept: Strahlengang für Winkel  $< 90^\circ$**

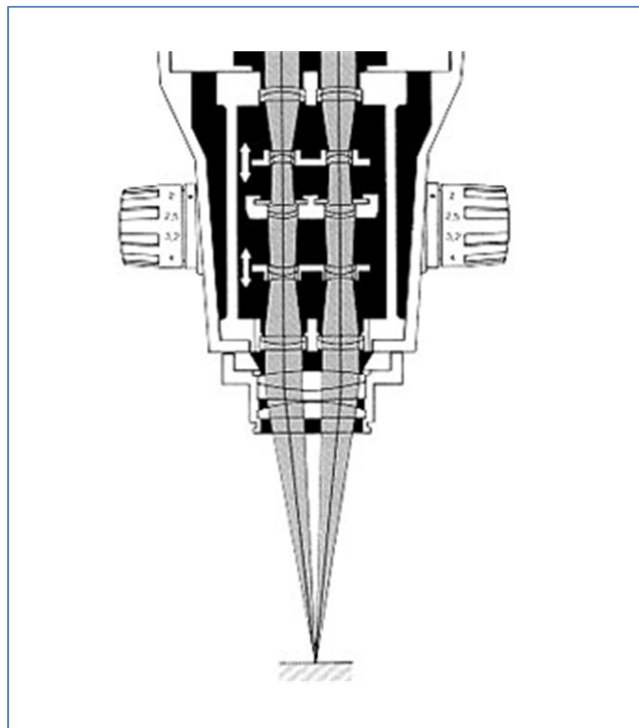


**Abbildung 32: Goniometerkonzept: Strahlengang für Winkel  $= 90^\circ$**

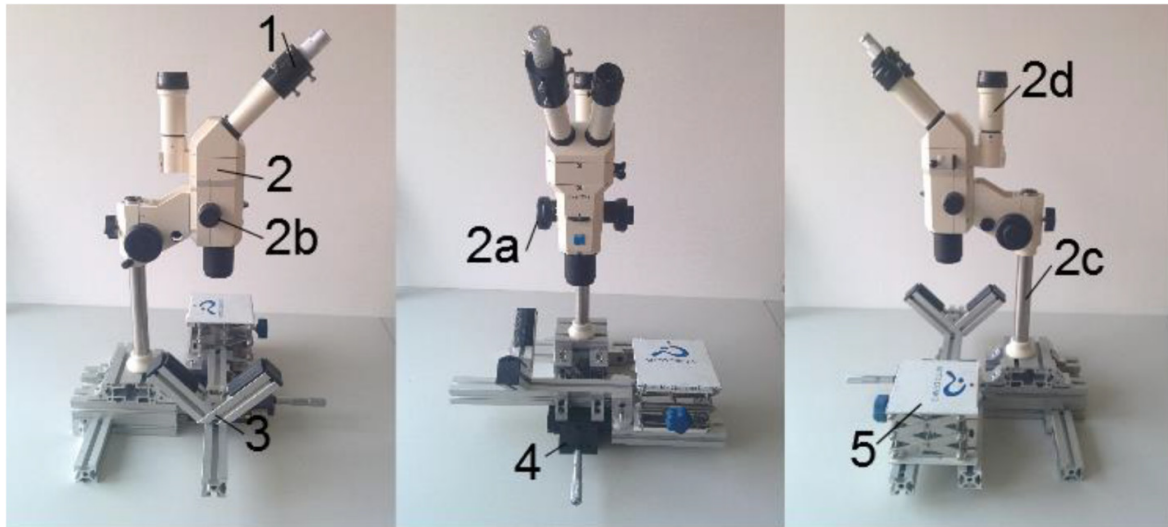
### **Aufbau des Prototyps**

Da das Goniometer Konzept von einem Mikroskopstrahlengang abgeleitet ist und zudem der Strahlengang Ähnlichkeit zum Strahlengang eines Stereomikroskops besitzt (Abbildung 33) wurden erste Tests mit einem Zeiss Stemi SV11 durchgeführt. Dabei wird der Abbildungsstrahlengang für das linke Auge als Beleuchtungsstrahlengang, und der rechte Abbildungsstrahlengang zur Messung benutzt. Der Aufbau ist in Abbildung 34 gezeigt.

Als Lichtquelle wird die LED einer Taschenlampe verwendet (Abbildung 34, Nr. 1). Diese wird am Ort des Zwischenbildes des linken Strahlengangs angebracht, das sich 1 cm unter dem Ende des Tubus befindet. Am Fototubus (Abbildung 34, Nr. 2d) wird eine Spiegelreflexkamera als Fotodetektor angebracht. Dabei wird das Bild aus dem rechten Strahlengang in den Fototubus abgebildet. Der Receiver muss zum Mikroskop ausgerichtet werden, sodass der Reflex der direkten Reflexion zentral im Strahlengang liegt, wie in Abbildung 34 gezeigt. Hierfür werden eine Linearführung und ein höhenverstellbarer Tisch (Abbildung 34, Nr. 4 und Nr. 5) verwendet.



**Abbildung 33: Strahlengang des Stereomikroskops Stemi SV 11**



**Abbildung 34: Prototyp basierend auf einem Stereomikroskop mit 1 Beleuchtung durch Optik für das linke Auge, 2 Tubus, 2a Schärfeeinstellung, 2b Zoom, 2c Ständer, 2d Fototubus, 3 Receiverhalterung, 4 Justiereinrichtung für Querrichtung, 5 Justiereinrichtung für Kippen**

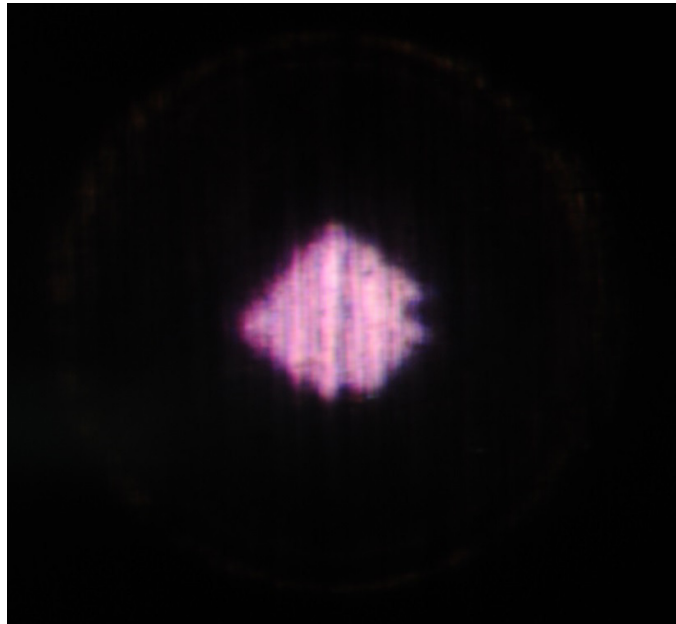
Um die Reproduzierbarkeit des Messaufbaus zu testen, wurde eine einfache Messvorschrift erstellt, die folgend erläutert ist:

*Der Receiver soll sich in einer waagerechten Position befinden und der Raum abgedunkelt sein. Der Abstand zwischen Glashüllrohr und Absorber sollte ca. 55 mm betragen, die Blende am Mikroskop sollte voll geöffnet sein. Die Kamera muss am Mikroskop montiert und angeschaltet sein (LV-Modus).*

1. *Einstellen der Position in x-Richtung (Zoom auf 0,6 stellen, Receiver in x-Richtung bewegen, bis sich die Reflexionen am Absorber in der Mitte der Kamera befinden)*
2. *Einstellen der Lichtquelle (Die Lichtquelle so lange hin und her bewegen, bis das Bild der Kamera scharf ist und Lichtquelle fixieren)*
3. *Einstellen der Höhe des Mikroskops (Zoom auf 3.2; Bild scharf stellen)*
4. *Foto machen und auswerten*

Ein nach dieser Vorschrift aufgenommene Fotografie der Messung der Reflexion einer Absorberschicht ist in Abbildung 35 zu sehen. Da bei der Messung die Lichtquelle und das Bild auf dem Absorber gleichzeitig scharf gestellt werden, sind sowohl die Umrisse der LED, als auch die Furchen in der Absorberschicht erkennbar.

Der relative mittlere Reflexionsgrad wird mit einem Matlab-Skript bestimmt. Dieses ermittelt über ein Histogramm die beleuchteten Pixel und ermittelt den Mittelwert aller Farbkanäle und aller beleuchteten Pixel. Aus einer Versuchsreihe mit dieser Methode ergab sich eine relative Wiederholgenauigkeit von 4% ( $1\sigma$ ). Würde ein Reflexionsgrad von 4% gemessen, so ergäbe sich eine absolute Wiederholgenauigkeit 0,16 % ( $1\sigma$ ).



**Abbildung 35: Kamerabild bei Messung des Reflexionsgrades mit dem Stereomikroskop**

Folgende Erfahrungen wurden mit dem Prototypaufbau gemacht: Als positiv erwies sich die Möglichkeit die Abbildung über eine Kamera zu betrachten. So ist es möglich die Abstände im System einfach zu justieren, bzw. die Qualität der Justage zu beurteilen.

Trotz der offensichtlichen Ähnlichkeit des Strahlengangs ist ein Stereomikroskop aber am Ende ungeeignet als Basis für ein Reflektometer für Receiver. Dies liegt einerseits am geringen Akzeptanzwinkel des Aufbaus von ca.  $4^\circ$ , der in der maßstäblichen Abbildung 33 erkennbar ist. Zudem sind nur begrenzt Einstellmöglichkeiten der Blenden vorhanden. Die Aperturblende kann nur für beide Strahlengänge gleichzeitig verändert werden. Eine unterschiedliche Blendeneinstellung, wie in Abbildung 31 zu sehen und eigentlich für die Messung zwingend erforderlich, ist nicht möglich. Verstellbare Feldblenden sind nicht vorhanden.

Zudem können, aufgrund der integrierten Bauweise des Mikroskops, nur schwer Modifikationen durchgeführt werden. Auch die feste Reflexionswinkelbeziehung hat sich schon bei diesen einfachen Vorversuchen als hinderlich erwiesen. So konnte beispielsweise nicht untersucht werden, ob die dunklen Furchen in Abbildung 35 tatsächlich das Licht stark absorbieren, oder ob das Licht nur in andere, vom Mikroskop nicht aufgefangene, Winkel reflektiert. Diese Fragestellung unterstreicht hier nochmal die Wichtigkeit eines ausreichend großen Akzeptanzwinkels des Messsystems und die Bedeutung der Fähigkeit eines Messsystems, stärker gestreutes Licht detektieren und diffus reflektiertes Licht charakterisieren zu können. Folgeprojekte zur Vermessung von Receivern mit diffus reflektierenden Oberflächen können auf den Resultaten dieses konzeptionellen Arbeitspaketes aufbauen. Für Receiver mit gerichteter Reflexion gibt es mittlerweile das Feldmessgerät „Mini-Incus“ von Abengoa.



### II.1.5. AP5 – Feldmessungen

Ziel des AP5 ist die Übertragung des in AP3 entwickelten, transienten Messverfahrens von einer Laboranwendung in ein feldtaugliches Messsystem und die Demonstration unter Umgebungsbedingungen eines Solarfeldes.

#### II.1.5.1. Vorbereitung der Messausrüstung für den Feldeinsatz und Optimierung der Auswerteroutine und des Messaufbaus

Für die Feldmesskampagnen werden die Pyrometer mit Hilfe von Rohrschellen am Strahlungs-Reflexionsmantel befestigt. Das durch die Pyrometer verursachte Moment wird über Gegengewichte kompensiert. Der Feldaufbau ist in Abbildung 36 dargestellt.

#### Schutz gegen Wind

Während den Messungen hat sich gezeigt, dass vor allem bei Windrichtungen parallel zum Receiver stärkere Temperaturschwankungen innerhalb des Strahlungs-Reflexionsmantels aufgrund schwankender Durchströmung auftreten. Verschiedene Ansätze, um den Einfluss der fluktuierenden Druckgradienten durch Wind gegenüber dem durch die Lüfter aufgetragenen Druckgradienten zu minimieren werden entwickelt. Abbildung 36 zeigt eine der Varianten, um über die „Luftkanäle“ die Windeinflüsse zu minimieren.

- Reduktion der fluktuierenden Druckgradienten innerhalb des Strahlungs-Reflexionsmantels aufgrund des Windes durch Umlenkungsbleche an Ein- und Austritt
- Künstliche Erhöhung des Druckverlustes zwischen Ein- und Austritt des Strahlungs-Reflexionsmantels durch Aufbringen von Netzen, Verkleinern der Aperturen und gleichzeitige Erhöhung der Lüfterleistung
- Umlenkungen der Öffnungen an Ein- und Austritt, so dass beide Öffnung in dieselbe Richtung zeigen (d.h. es liegen ähnliche Staudrücke an)

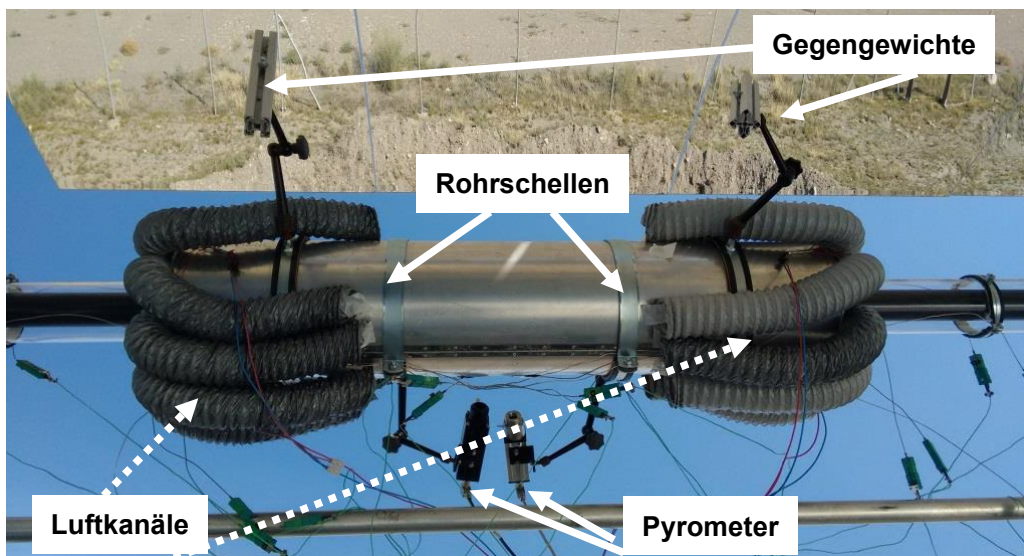


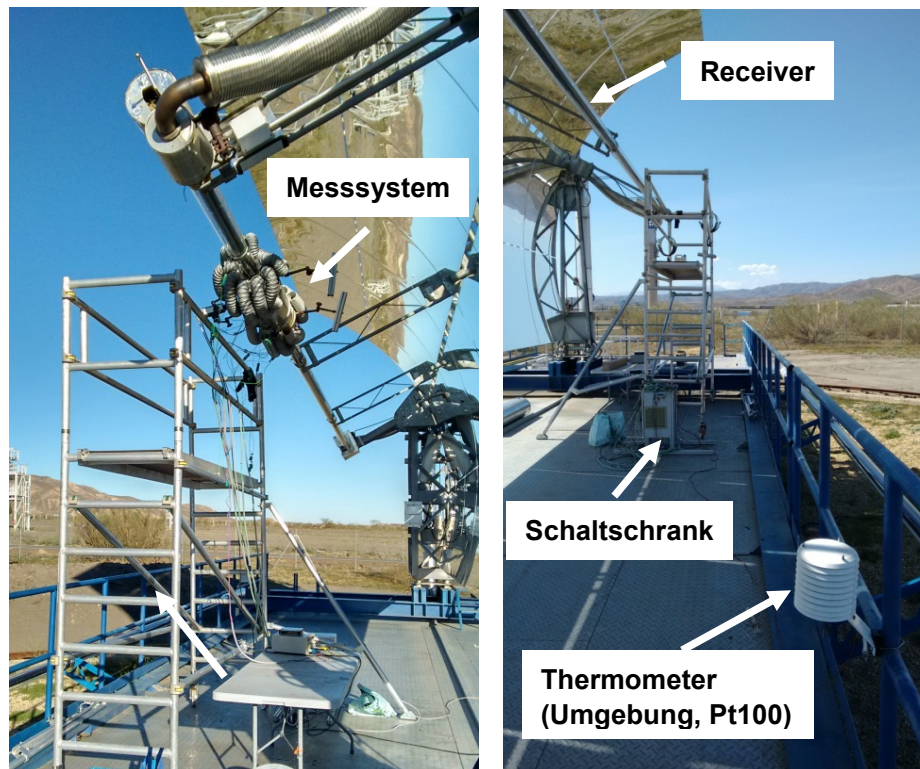
Abbildung 36: Variante zur Minimierung von Windeinflüssen und Strahlungsreflexionsmantel

### Feldpyrometer für Glashüllrohr-Temperaturmessung

Zur Messung der Glastemperatur im Feld wird ein Pyrometer des Typs Sensortherm MY84 benutzt (Wellenlänge: 8-14 $\mu$ m, Temperaturmessbereich: 0 – 400°C, fokusierbare Optik, Einstellzeit  $t_{95}$ : 100ms). Das zuvor im Labor eingesetzte Dias DT44LH hat ein etwas höheres Signal-Rausch-Verhältnis im Vergleich zu den Spezifikationen aufgewiesen.

### Überblick über den Aufbau

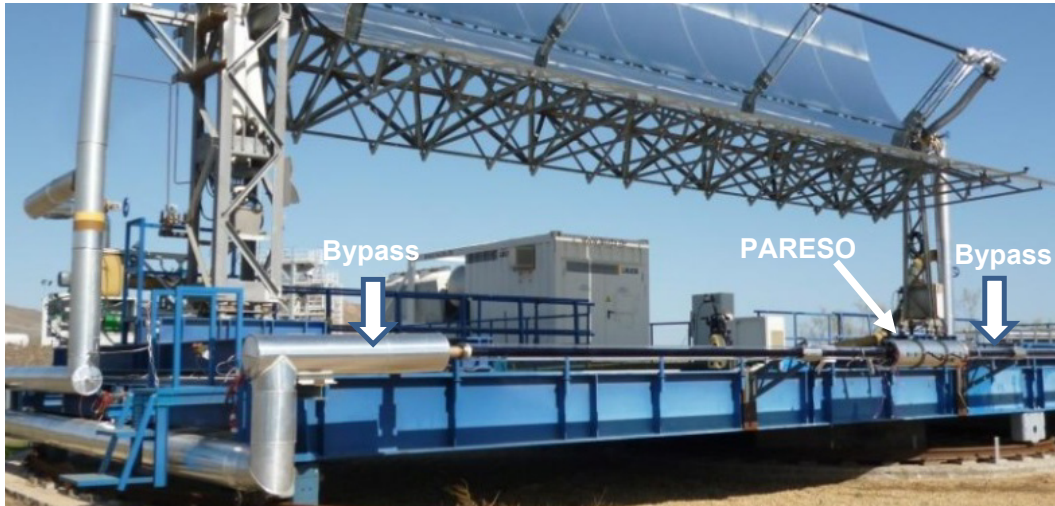
Der Aufbau der Messtechnik am KONTAS-Drehteststand ist in Abbildung 37 dargestellt. Der Schaltschrank für die Messdatenerfassung befindet sich hier liegend auf der Drehplattform. Das Messsystem wird über ein Funknetzwerk (W-LAN) mit dem Messrechner verbunden, so dass die Versuche im Versuchscontainer überwacht werden können.



**Abbildung 37: Aufbau des Messsystems am KONTAS-Drehteststand mit Schaltschrank zur Datenerfassung und Überwachung der Umgebungstemperatur.**

### KONTAS-Bypass

Im Rahmen des PARESO-Projekts ist der KONTAS-Drehteststand mit einem Bypass in zugänglicher Höhe erweitert worden. Somit werden die Entwicklungsarbeiten an der Messtechnik auch ohne Aufsteigen auf ein Gerüst ermöglicht (Abbildung 38).



**Abbildung 38:** Installierte PARESO-Messtechnik am gut zugänglichen „KONTAS-Bypass“ zur Vermessung von eingebauten Receivern

#### II.1.5.2. Feldmessung durch beliebige Anregung

Insgesamt sind in AP5 über 100 Messungen durchgeführt worden. Die ersten Feldmessungen werden als funktionale Probeversuche bei verschiedenen Absorbertemperaturen durchgeführt, um die Machbarkeit der im Labor untersuchten nicht-sinusförmigen Anregung zu prüfen und die Einstellungen der beiden Infrarot Pyrometer für Feldmessungen zu bestätigen. Während der Versuche werden die Einstellungen des PID-Reglers der KONTAS-Temperiereinheit angepasst, um die beobachtete Einschwingung der Absorbertemperatur während einer transienten Anregung zu minimieren.

Das Pyrometer Sensortherm MY84 zur Messung der Glastemperatur zeigt ein ähnliches Signal-Rausch-Verhältnis wie das Dias Infrared DT44LH, trotz einer deutlichen niedrigeren Erwärmung des Gehäuses und einer hinsichtlich dem Signal-Rausch-Verhältnis optimalen Anpassung von Einstellzeit und Temperaturmessbereich.

Während den ersten Feldmesskampagnen werden die Einflüsse der Windgeschwindigkeit, besonders der Windböen, und die Variation der Umgebung- bzw. Lufttemperatur im Strahlungs-Reflexionsmantel auf das transiente Messverfahren beobachtet. Um die Robustheit des Messverfahrens gegen diese Störungen zu verbessern, wird der Strahlungs-Reflexionsmantel mit verschiedenen Windschutz-Anbauten erweitert, um den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die transiente Glastemperatur zu minimieren. Zusätzlich werden weitere Thermoelemente an beiden Stirnseiten des Strahlungs-Reflexionsmantels angebracht, um die Temperatur der Luftströmung und des Mantels besser überwachen zu können. Die Auswerteroutine wird wie im AP1 beschrieben (Möglichkeit 3b) erweitert. Damit werden die Variationen der Lufttemperatur im numerischen Modell dynamisch berücksichtigt und kompensiert. Mögliche Störungen durch direkte Solarstrahlung in der Pyrometer Optik werden beseitigt.



Im Anschluss an die Entwicklung konstruktiver Gegenmaßnahmen hinsichtlich Umgebungsstörungen und der Anpassung der Auswerteroutine (siehe AP1) werden neue Feldmesskampagnen mit dem optimierten Messaufbau an den eingeschweißten Receiverproben des AP 3 durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit der Auswerteroutine „Möglichkeit 3b“ erzeugt (siehe, AP1, Seite 12-15) und sind in Tabelle 9 und Abbildung 39 dargestellt.

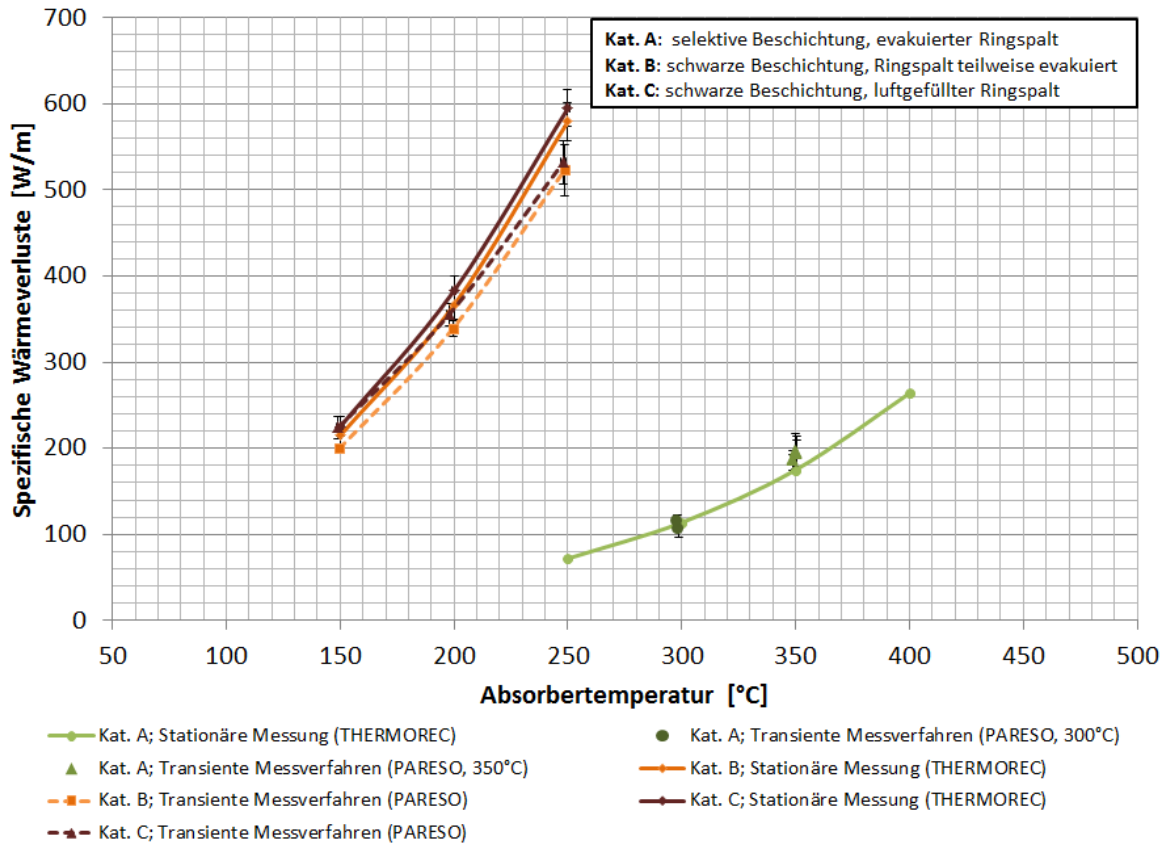
Es wird eine gute Übereinstimmung der spezifischen Wärmeverluste für Receiver der Kategorie A zwischen den Referenzrechnungen im DLR ThermoRec („steady-state“; Messunsicherheit ungefähr kleiner als 10 W/m) und den transienten Feldmessungen für alle Arbeitspunkte beobachtet. Die relativen Abweichungen liegen knapp unterhalb 10%, die absoluten Abweichungen unterhalb von 20 W/m. Die Übereinstimmung ist etwas schlechter als unter Labormessungen. Zusätzlich wurden die Wärmeverlustmechanismen für die Kategorie A befriedigend getrennt. Der Emissionsgrad  $\epsilon_{abs}$  und der Wärmeübergangskoeffizient  $h_{ann}$  werden in den vorliegenden Messungen von der Auswerteroutine leicht überschätzt worden, was zur Folge hat, dass die mit dem transienten Messverfahren bestimmten spezifischen Wärmeverluste leicht oberhalb der Werte der Referenzmessungen liegen.

**Tabelle 9: Ergebnisse der transienten Receivermessungen im Feld (PARESO) im Vergleich zu stationären ThermoRec-Messungen als Referenz**

	Rohrkategorie	Kategorie A selektiv/evakuiert		Kategorie B schwarz / nur teilweise evakuiert			Kategorie C schwarz / Luft		
		A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3
	Arbeitspunkt								
	$T_{abs,o}$ [°C]	298.0	349.7	149.6	199.6	248.5	148.5	198.1	248.0
	$\epsilon_{abs}$ [%]	10.1%	11.2%	91.8%	89.6%	62.8%	77.2%	59.9%	33.4%
	$h_{ann}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	0.088	0.032	0.192	0.155	5.16	2.833	5.714	11.69
	Optimierungskriterium $\delta^2$	0.38	0.26	0.56	0.33	0.55	0.40	0.40	0.35
TRANSIENT	$\dot{Q}'_{th,loss}$ [W/m] TRANSIENT (A) Standard Bedingungen ( $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ , $v_{wind} = 0$ m/s)	123	192	199	340	523	220	351	531
	$\dot{Q}'_{th,loss}$ [W/m] ThermoRec (B)	112.0	175	214	365	572	221	376	586
STEADY-STATE	Absolute Abweichung; (A-B) [W/m]	11	17	-15	-25	-49	-2	-26	-54
	Relative Abweichung; (A-B)/B [%]	9.6%	10.0%	-6.8%	-6.9%	-8.6%	-0.8%	-6.8%	-9.3%

Im Vergleich der spezifischen Wärmeverluste zwischen stationären und transiente Messungen für Receiver der Kategorie B und C wird prozentual eine ähnliche gute Übereinstimmung für alle Arbeitspunkte beobachtet. Die relativen Abweichungen liegen zwischen 6.8% und 8.6% für Kategorie B, bzw. zwischen 0.8% und 9.3% für Kategorie C. Die von dem transienten Messverfahren bestimmten Wärmeverluste liegen systematisch unterhalb der Referenz stationären Messungen. Die Trennung der Wärmeverlustmechanismen funktioniert bei diesen Experimenten allerdings nicht so gut wie bei Receivern der Kategorie A. Bei Receivern der Kategorie C ist dies besonders deutlich. Der Emissionsgrad  $\epsilon_{abs}$  wird signifikant unterschätzt, während der Wärmeübergangskoeffizient  $h_{ann}$  im Vergleich zu den Labormessungen deutlich überschätzt

wird. Die schlechtere Qualität der Trennung des Wärmeübergangsmechanismus wird auch teilweise darin beobachtet, dass das Optimierungskriterium für Kategorien B und C im Vergleich mit der Kategorie A teilweise oberhalb von 0,40 liegt, was auf potenzielle numerische Konvergenzschwierigkeiten der Auswerterroutine hinweist. Solche Effekte beeinflussen allerdings weniger die Bestimmung der Wärmeverluste, sondern mehr die Trennung der Wärmeverlustmechanismen. Die spezifischen Wärmeverluste werden mit der transienten Methode gut reproduziert.

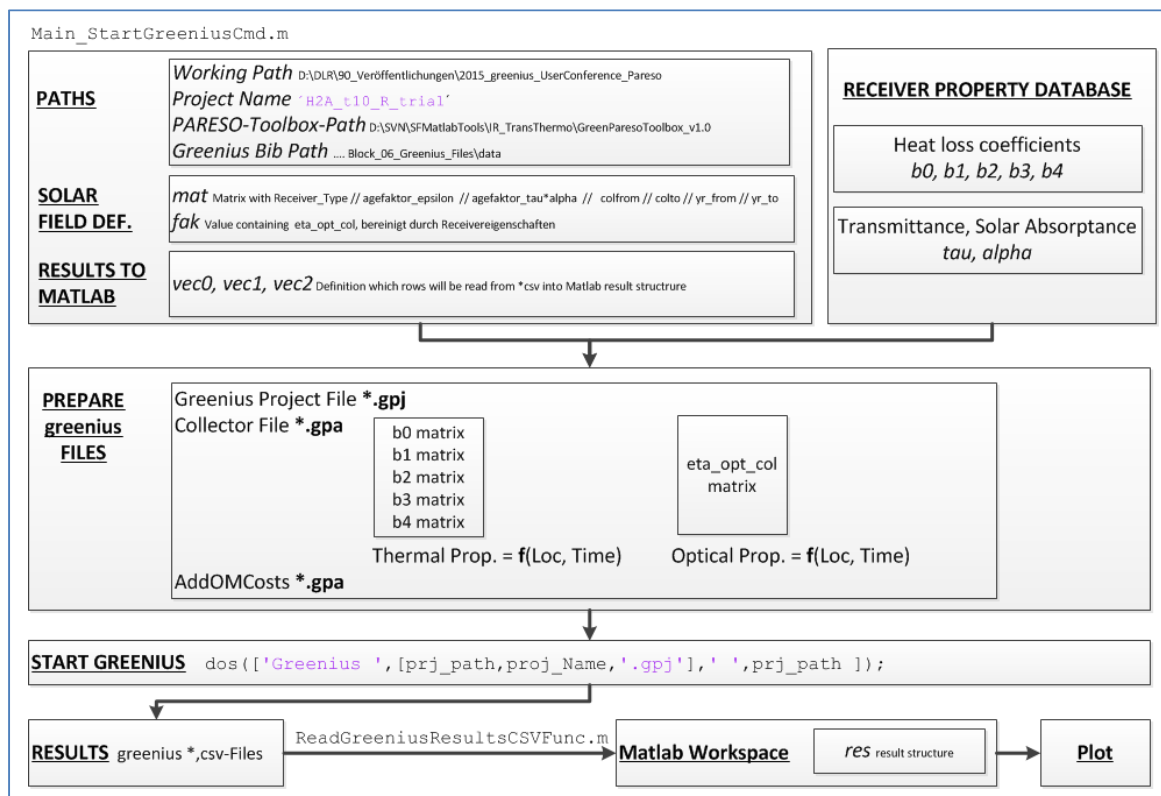


**Abbildung 39: Ergebnisse der transienten Receivermessungen im Feld (PARESO) im Vergleich zu stationären Messungen im Labor (ThermoRec) als Referenz. Die spezifischen Wärmeverluste beider Methoden stimmen gut überein.**

### II.1.6. AP6 – Techno-Ökonomische Analyse

Ziel des AP 6 ist die Erstellung eines Software-Werkzeugs, welches die Aussage erlaubt, ab welchem Degradationsgrad der Austausch eines Receivers bei gegebenem Projektzeitpunkt ökonomisch sinnvoll ist.

Hierzu wird die Software *greenius* erweitert, um räumlich inhomogene Kollektorloops und eine zeitliche Änderung der optischen und thermischen Receiverqualität zu berücksichtigen. Die Funktionalität, zusätzliche Investitionen für die Reparatur zu bestimmten Zeitpunkten während des Projektes zu berücksichtigen, wird in *greenius* integriert. Die Vorbereitungen der Simulation sowie das Postprocessing der Daten erfolgt dabei mit Matlab-Skripten. Abbildung 40 zeigt den Ablaufplan einer techno-ökonomischen Analyse.



**Abbildung 40: Ablaufplan zum Start der Berechnung von techno-ökonomischen Analysen im Zusammenspiel von Matlab-Skripten, einer Receiver-Datenbasis und der neuen greenius-Version.**

Zur Demonstration der Fähigkeiten der neuen greenius-Version und der angefertigten Matlab-Skripte wird im Folgenden eine Analyse verschiedener Receiver-Szenarien vorgestellt.

Die Studie untersucht, wie sich verschiedene Receiver-Schadensfälle, wie Bruch des Glashüllrohrs durch einen Windevent, Wasserstoffansammlung im Ringspalt oder Beschädigung der Antireflex-Beschichtung auf die energetische und wirtschaftliche Performance eines solarthermischen Kraftwerk-Projektes auswirkt. Weitere Details der Studie befinden sich in [Röger 2015].

### II.1.6.1. Referenzanlage

Für die techno-ökonomische Analyse wird ein modernes Parabolrinnen-Kraftwerke mit 150 MW elektrischer Leistung, 7,5h Salzspeicher und VP-1 als Wärmeträgerfluid entworfen. Ma'an in Jordanien mit sehr guter jährlicher Direktstrahlung wird als ein Standort gewählt. Für diese Konfiguration wird die Solarfeld-Größe hinsichtlich minimaler Stromgestehungskosten optimiert. Es resultieren 360 Loops (EuroTrough-Kollektor). Die gesamte Länge aller Receiver beträgt 207 km (51'840 Receiver). Der Kraftwerksblock benutzt Trockenkühlung. Die Turbine hat einen Bruttowirkungsgrad von 38.5% und es sollen keine fossilen Brennstoffe eingesetzt werden. In Tabelle 10 sind weitere Informationen zu Technologie, Ort, meteorologischen Parametern, Kosten, Finanzierung und den wichtigsten Ergebnisse der Referenzanlage dokumentiert. Die Stromgestehungskosten (LEC) betragen für das Referenz-Szenario 11,3 €cent/kWh<sub>el</sub>.

**Tabelle 10: Technologie, Ort, meteorologische Parameter, Kosten, Finanzierung und die wichtigsten Ergebnisse des zugrunde liegenden Referenz-Szenarios**

Technology		Costs	
Collector	good-quality EuroTrough-type: aperture 5.76m, length 148.5m optical collector efficiency: 0.78	Solar field	200 €/m2
Receiver	51'840 pieces, see Fig.1 and Table 2 to 4	Storage	40 €/kWh
		Power Block	950 €/kW
Field	360 loops, 4 collectors each inlet temp. 292°C, outlet temp. 393°C heat transfer fluid VP1	Land	8.8 M€
		Other	project development: 5% on I. insurance constr. phase:1% on I. supervision & startup: 5% on I.
Storage	two-tank molten salt net capacity: 2'900 MWh <sub>th</sub> (7.5h) relative heat loss 1%/24h	Contingencies	7% on investment and other
		Total	Total invest. costs: 595.9 M€ of which EPC: 493.8 M€
Power Block	turbine 149'900 kW, eff. 38.5% dry cooling	Running Costs	O&M, insurance: 14.0 M€/yr
Fossil Firing	none	(I.= Investment)	
Location and Meteorological Parameters		Financing	
Location	Maan, Jordan 30.1720°N, 35.8183°E, 1012 m a.s.l.	Funding	debt 75%, 5% interest rate equity 25%
Meteo	GHI: 2323 kWh/m²a; DNI: 2820 kWh/m²a Mean wind: 3.8m/s; mean temp.: 18.3°C Source: enerMENA Network, 2013	Discount Rate	6%
		Operating Time	25 years
		Construct. Time	2 years
Technical Key Results		Economic Key Results	
Field Efficiency	52.0%	Resulting LEC	0.113 €/kWh <sub>el</sub>
System efficiency	17.2%	Net Present Value	73.2 M€
Thermal field output	43.161 GWh <sub>th</sub>	Tot. Disc. Cash Flow	218.0 M€
Dumping	1.3 GWh <sub>th</sub> (3% of field output)	Payback Period	13.26 years
Heat loss field	3.1 GWh <sub>th</sub> (7.1% of field output)		Discounted: 18.34 years
Total net electric.	14.270 GWh <sub>el</sub>	IRR on equity	8.36% at tariff of 0.13 €/kWh <sub>el</sub>

### II.1.6.2. Szenarien

Das Referenzszenario ("Ref") verwendet Standard-Receiver unter der Annahme, dass diese über die gesamte Betriebszeit keiner Degradation unterliegen. Im Szenario "Ref-Xe" entscheidet sich der Errichter des Solarkraftwerks während der Bauphase 6,2 Mio. € mehr (+1,3% der Solarfeldkosten) in Premium-Receiver mit Xe-Kapseln anstelle der Standard-Receiver zu investieren. Diese Kapseln können geöffnet werden im Falle, dass über die Laufzeit zu viel Wasser-



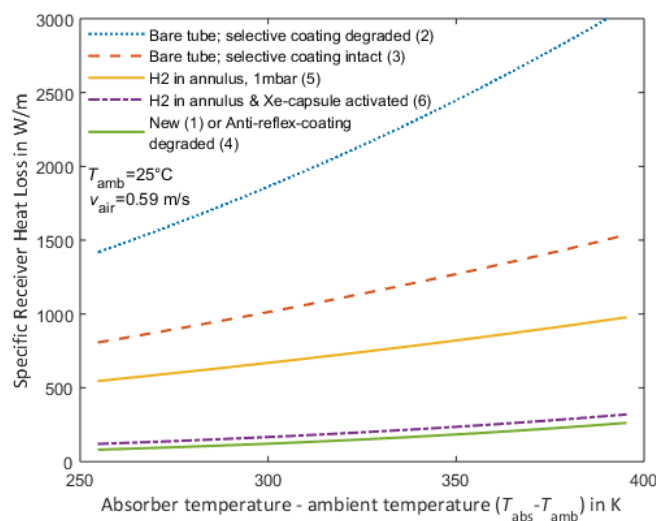
stoff in den Ringspalt diffundiert ist. Durch das Öffnen der Xe-Kapseln reduzieren sich die Wärmeverluste wieder fast auf den ursprünglichen Zustand.

Im Szenario "WindA" wird angenommen, dass ein Windereignis durch umherfliegende Trümmer 5,6% der Glashüllrohre an den Feldgrenzen zerstört und als Folge die selektiven Beschichtung degradiert. Ein Betrag in Höhe von 3,3 Mio. € kann investiert werden, um die defekten Receiver durch neue zu ersetzen. Das "WindB"-Szenario geht vom gleichen Schaden aus, aber unter der Annahme einer stabilen selektiven Beschichtung unter Luft.

Die "AR"-Szenario betrachtet eine allmähliche Abnutzung der Antireflexbeschichtung (AR) an der Glashülle. Für die Studie, wird davon ausgegangen, dass dieser Prozess im ersten Jahr beginnt und im Jahr  $t$  mit völlig zerstörter AR-Beschichtung im gesamten Solarfeld als Grenzfall endet. Im Szenario des Ersatzes defekter Rohre werden 52,4 Mio. € im Jahr  $t+1$  investiert. Der Schadenfalls kann auftreten bei Nutzung stark scheuernder Reinigungsmethoden oder bei minderwertigen Receivern.

Der Wasserstoff-Szenario "H2" unterliegt der Annahme einer plötzlichen Ansammlung von Wasserstoff im Raum zwischen Absorber- und Glashüllrohr durch Diffusion von Wasserstoff aus dem Wärmeübertragungsfluid bei gesättigtem Getter. Eine Sättigung des Getters kann durch zu hohe Wasserstoffkonzentration im Wärmeübertragungsfluid oder im Falle von minderwertigen Receivern mit reduzierter Gettermenge auftreten. Es wird angenommen, dass ausschließlich der höhere Temperaturbereich des Feldes, d. h. 50% aller Receiver, betroffen ist. Die Kosten für den Austausch der Receiver werden mit 26,5 Mio. € veranschlagt. Eine Reparatur-Lösung ("Fix") ist prinzipiell attraktiver sein, wenn sie verfügbar ist. Die Reparaturkosten werden mit 200 € pro Receiver angenommen. (50% des Feldes: 5,6 Mio. €). Für den Fall, dass der Anlagenbauer Receiver mit Xe-Kapseln installiert hat (Szenario „Ref-Xe“), würden diese nach dem Schadensereignis ohne nennenswerte Reparaturkosten aktiviert werden.

Da der Zeitpunkt des Schadensereignis eine große Rolle spielt, werden verschiedene Schadensereignis-Zeitpunkte betrachtet (Betriebsjahr  $t=5, 10$  oder  $15$ ). Die spezifischen Wärmeverluste der neuen, degradierten oder regenerierten Receiver Typen sind für eine Umgebungstemperatur von  $25^\circ\text{C}$  und eine Luftgeschwindigkeit von  $0,59 \text{ m/s}$  in Abbildung 41 dargestellt.



**Abbildung 41: Spezifischer Wärmeverlust in W/m der im Szenario berücksichtigten Receiver**

### II.1.6.3. Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse sind von beispielhaftem Charakter, da sie stark von den jeweiligen Kosten- und Finanzierungsannahmen abhängen. Anlagenbetreiber sollten die Berechnungen für ihre eigenen spezifischen Bedingungen mit dem vorgeschlagenen Verfahren wiederholen.

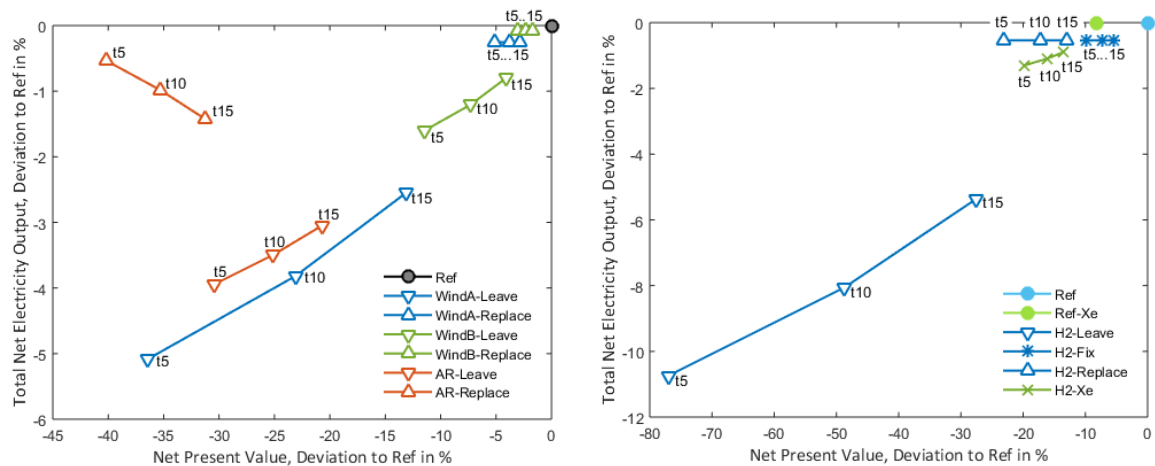
Abbildung 42 zeigt die gesamte Elektrizitätsproduktion über 25 Jahre Laufzeit, aufgetragen über dem Netto-Kapitalwert (als Relativwerte zum Referenz-Szenario) für die Wind- und Antireflexbeschichtungs-Szenarien (links) sowie für die Wasserstoff-Szenarien (rechts). Aus wirtschaftlicher Sicht sollte der Kapitalwert möglichst nahe am Referenzszenario (kein Schaden) liegen. Aus energetischer Sicht sollte das Projekt eine maximale Elektrizitätsmenge liefern. Daher befinden sich die bevorzugten Szenarien in der Nähe der Referenzszenarien in der rechten oberen Ecke des Diagramms der Abbildung 42.

Im Vergleich zum Referenz-Szenario ohne Beschädigung verursacht ein Windereignis mit Glashüllrohrbruch bei 5,6% der Receiver in Jahr 5 (10, 15) und darauffolgender Degradation der selektiven Beschichtung („WindA“) die Stromproduktion um 5,1% (3,8%, 2,5%). Der Netto-Kapitalwert wird um 36,5% (23,1%, 13,1%) reduziert. Da die Amortisationszeit des Receiver-austausches nur 0,7 Jahre beträgt, wird empfohlen, die Receiver auszutauschen. Die gleichen Aussagen gelten für den Windevent mit stabilen selektiven Receiverbeschichtungen („WindB“), allerdings sind die Zahlen weniger stark ausgeprägt. Auch hier ist ein Austausch der Receiver eine wirtschaftlich und energetisch tragfähige Lösung.

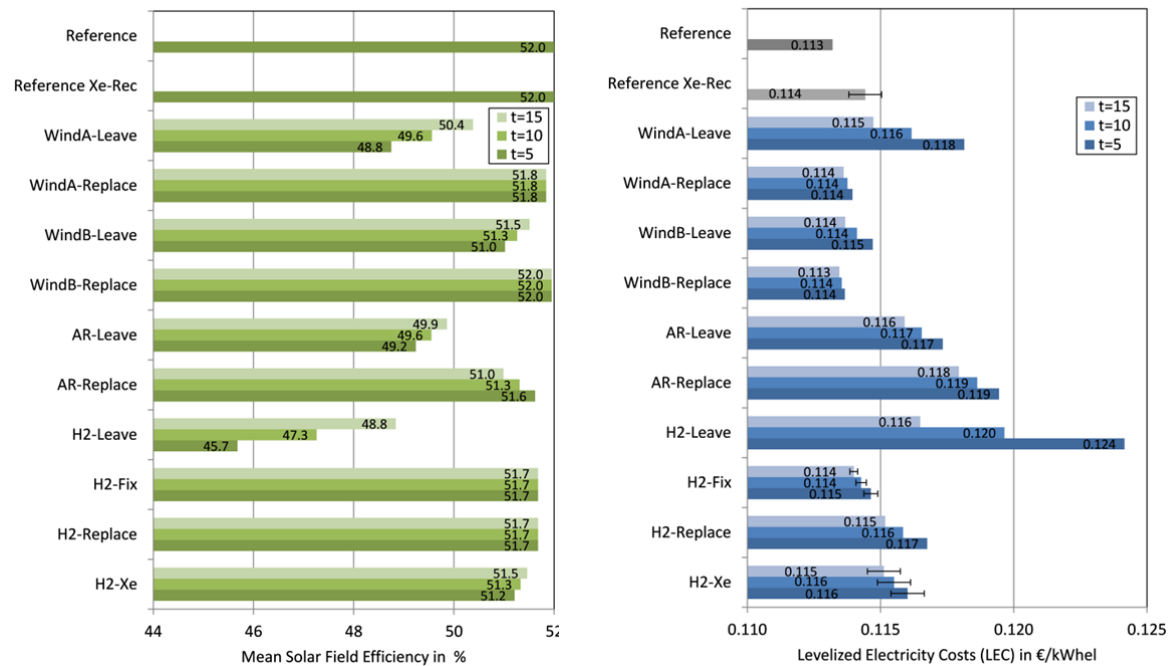
Falls eine Degradation der Antireflexionsbeschichtung auftritt, zahlt sich ein Austausch der Receiver nicht aus.

Die höchste negative Auswirkungen auf die Performance und den Netto-Kapitalwert eines Projektes hat das Wasserstoff-Szenario (50% des Solarfeldes betroffen) im Projektjahr 5 (10, 15). Dies führt zu einer Verringerung der Elektrizitätsproduktion um 10,7% (8,1%, 5,4%) und zu einer Reduktion des Netto-Kapitalwerts von 77,0% (48,7%, 27,6%). Der rasche Ersatz der Receiver oder noch besser eine kostengünstige Reparaturlösung ist eine energetisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung. Die Möglichkeit der Investition in Premium-Receiver mit Xe-Kapsel während der Bauphase ist eine praktikable Option, wenn die Zusatzkosten für Premium-Receiver niedriger als 10 bis 20 Prozent des Receiverpreises sind und ein Wasserstoff-Problem auch wirklich auftritt.

Abbildung 43 visualisiert den mittleren Solarfeld-Wirkungsgrad über 25 Laufzeit (links) und die daraus resultierenden Stromgestehungskosten (LEC, rechts) für die verschiedenen Szenarien. Der über 25 Jahre mittlere Solarfeld- Wirkungsgrad variiert zwischen 52% (Referenz-Szenario) und 45,7% (Szenario mit Wasserstoff-Schadensevent in Projektjahr  $t=5$ ). Die Stromgestehungskosten variieren dabei zwischen 11,3 €cent/kWh<sub>el</sub> (Referenz-Szenario) und 12,4 €cent/kWh<sub>el</sub> (Wasserstoff-Szenario, Steigerung von knapp 10% gegenüber dem Referenz-Szenario). Weitere Details der Studie befinden sich in [Röger 2015].



**Abbildung 42: Gesamte Elektrizitätsproduktion über 25 Jahre Laufzeit, aufgetragen über dem Netto-Kapitalwert (relativ zum Referenz-Szenario). Wind und Anti-Reflex-Schicht Szenarien (links) und Wasserstoff-Szenarien (rechts)**



**Abbildung 43: Mittlerer Solarfeld-Wirkungsgrad über 25 Laufzeit (links) und die daraus resultierenden LEC (rechts) für die verschiedenen Szenarien**

## II.2. Nutzen, Verwertbarkeit, Erfahrungen

Ein feldtaugliches und validiertes Messverfahren zur Messung der thermischen Verluste von eingebauten Receivern war bisher auf dem Markt nicht verfügbar. Diese Messtechnik unterstützt eine dauerhafte Gewährleistung der Leistung und Effizienz von solarthermischen Kraftwerken, damit die prospektierten wirtschaftlichen Erträge über die Laufzeit eines Kraftwerks erreicht werden. Das Messverfahren wird sinnvollerweise auf ausgewählte Rohre im Feld angewendet, welche durch ein Screening mit einem qualitativen Verfahren, z. B. mit bodengestützten IR-Kameras oder auf UAV montierte IR-Kameras, ausgewählt worden sind. Werden defekte Receiver oder Receiver mit Wasserstoff-Permeation im Ringspalt entdeckt und deren Wärmeverlust dem PARESO-Verfahren quantifiziert, erlaubt ein im Projekt weiterentwickeltes techno-ökonomisches Berechnungsmodell, den Austausch von einzelnen Receivern von energetischer wie finanzieller Seite zu beurteilen.

Vermarktungsfähige und lizenzierbare Produkte/Verfahren sind:

- Prototyp und validiertes Messverfahren zur quantifizierten Messung der thermischen Verluste von eingebauten Receivern im Solarfeld
- Berechnungswerkzeug für technisch-ökonomische Analyse

Die Zielgruppe einer Vermarktung dieses Messverfahrens und des Berechnungstools besteht u. a. aus folgenden Unternehmen: Kraftwerksbetreiber, Kraftwerkseigner, Receiver-Hersteller sowie vor allem Dienstleister im Bereich Qualifizierung von solarthermischen Kraftwerken. Die nächsten Schritte zu einer Einführung in den Markt ist der Nachweis der Praxistauglichkeit in einem kommerziellen Solarfeld.

## II.3. Fortschritt anderer Stellen

Im Rahmen des Projektverlaufs wurde von der spanischen Firma Abengoa Solar ein Feldmessgerät zur Messung des solaren Absorption- und Transmissionsgrades von Receivern entwickelt, welches sich mit dem Ziel des AP4 deckt. Diese Entwicklung war zu Projektbeginn noch nicht absehbar. Das Messgerät funktioniert unter Annahme, dass Licht am Absorber- bzw. Glashüllrohr gerichtet und nicht diffus reflektiert wird. Unter den angenommenen Rahmenbedingungen ist der solare Absorption- und Transmissionsgrad von Receivern so messbar.

Während der Arbeiten am AP4 hat sich gezeigt, dass nicht alle Receiver dieser Annahme unterliegen. Daher umfasst die Konzeptentwicklung des AP4 auch Verfahren, welche auch Receiver mit diffus reflektierenden Eigenschaften wissenschaftlich korrekt messen können. Mehr Details finden sich in Abschnitt II.1.4.

## II.4. Veröffentlichungen der Ergebnisse

- |                 |  |
|-----------------|--|
| [Geller 2012]   | J. Geller, 2012, <i>Bestimmung der Wärmeverluste von Receiverrohren mittels transients Thermografie</i> , Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Deutschland, DLR Institut für Solarforschung, Almería, Spanien. |
| [Gärtner, 2013] | D. Gärtner, 2013, <i>Laboratory Heat Loss Measurements of Parabolic Trough Receivers based on transient thermography</i> , Masterarbeit, Universität Kassel, Deutschland, DLR Institut für Solarforschung, Almería, Spanien. |

- [Heppner, 2014] H. Heppner, 2014, *Transient Measurement Method for the Determination of Parabolic Trough Receiver Heat Losses under Field Conditions; Testing and Optimization*, Masterarbeit, RWTH Aachen Universität, Deutschland, DLR Institut für Solarforschung, Almería, Spanien.
- [Röger 2014] M. Röger, P. Potzel, J. Pernpeintner, S. Caron, 2014, *A Transient Thermography Method to separate Heat Loss Mechanisms in Parabolic Trough Receivers*, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 136, No. 1, 011006 (9 pages), Februar 2014, doi:10.1115/1.4024739
- [Caron 2015a] S. Caron, M. Röger, 2015, *Modelling, Simulation and Identification of Heat Loss Mechanisms for Parabolic Trough Receivers Installed in Concentrating Solar Power Plants*, IFAC PapersOnLine Vol.48, Issue 1, 372-377, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.05.058
- [Caron 2015b] S. Caron, M. Röger, J. Pernpeintner, 2015, *Transient Infrared Thermography Heat Loss Measurements on Parabolic Trough Receivers Under Laboratory Conditions*, SolarPaces 2014 Energy Procedia, Vol. 69, 310-319, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.035
- [Caron 2015c] S. Caron, M. Röger, J. Pernpeintner, 2015, *PARESO - Messung der Wärmeverluste von Parabolrinnen-Receiver im Solarfeld*, 18. Kölner Sonnenkolloquium (Poster).
- [Röger 2015] M. Röger, E. Lüpfer, S. Caron, S. Dieckmann, 2015, *Techno-economic analyses of receiver replacement scenarios in a parabolic trough field*, presented at SolarPaces 2015 Conference, Cape Town, South Africa, 13-16 October 2015, will be published in AIP, <http://proceedings.aip.org>

### Weitere Informationen / Literatur des wissenschaftlich-technischen Teils

- [Pfänder 2006] M. Pfänder, 2006, *Pyrometrische Temperaturmessung an solarthermischen Hochtemperaturreceivern*. Dissertation, Physik und Chemie, TU Bergakademie Freiberg, Deutschland.
- [Mateu 2011] E. Mateu, M. Sanchez, D. Perez, A.G. Jalon, S. Forcada, I. Salinas, C. Heras, 2011, *Optical Characterization Test Bench for Parabolic Trough Receivers*, SolarPACES Proceedings 2011, 20- 23 September, Granada, Spanien.
- [Rueda 2014] G. Espinosa- Rueda, N. Martinez-Sanz, D.Izquierdo-Nuñez, M. Osta-Lombardo, 2014. *A novel portable device to measure transmittance and reflectance of parabolic trough receiver tube in the field*, Proceedings of the ASME 8<sup>th</sup> International Conference on Energy Sustainability, June 30 – July 2. 2014, Boston, Massachusetts, USA. ES2014-6500.
- [Kutscher 2014] C. Kutscher, J.C. Netter, 2014. *A Method for Measuring the Optical Efficiency of Evacuated Receivers*, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 136, No. 1, 010907 (5 pages), Februar 2014, doi: 10.1115/1.4026335
- [Georg 2015] A. Georg, J. Pernpeintner, 2015. *StaMeP: Entwicklung von standardisierten Messmethoden und Prüfständen für den Leistungsnachweis von Bauteilen solarthermischer Kraftwerke*, 18. Kölner Sonnenkolloquium (Poster).